



저작자표시-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

연약지반에서의 지하공동 굴착시 지반침하에 관한 연구

**A Study on the Settlement of Underground Excavation
in the Soft Ground**



지도교수 장 원 일

2015년 7월

한국해양대학교 대학원

해양에너지자원공학과

김 기 호

본 논문을 김기호의 공학석사 학위논문으로 인준함.



위원장 유 경 근 (인)

위 원 장 원 일 (인)

위 원 정 우 근 (인)

2015년 7월

한국해양대학교 대학원

목 차

List of Tables	iv
List of Figures	v
Abstract	vi

1. 서 론

1.1 연구배경	1
1.2 국내외 지반침하 관련 연구동향	2

2. 기본 이론

2.1 지반침하	4
2.2 지반침하의 매커니즘 분석	5
2.2.1 수치해석에 의한 침하영향 분석	5
2.3 지반보강을 위한 주입공법	6
2.4 에폭시 수지의 조성 및 특성	7

3. 실내 모형 실험

3.1 실험 방법 및 내용	8
3.1.1 모형 토조 및 모형 지반 제작	8
3.1.2 모형 터널 설계	10
3.1.3 지반 보강을 위한 주입장치 및 주입재	12
3.2 모형 실험 과정 및 실험 결과	14

4. 수치해석법	
4.1 수치해석법의 종류 및 특징	25
4.1.1 유한차분법	27
4.1.2 FLAC	28
4.1.3 FLAC의 흐름도	29
4.2 모델링 개요	31
4.3 해석 결과	35
4.4 보강범위를 달리한 수치해석 결과	45
4.5 현장자료를 적용한 수치해석	52
5. 결론	58
참고문헌	60



List of Tables

Table 1 Type of subsidence	5
Table 2 Property value of the model ground	9
Table 3 Property value of the epoxy resin	13
Table 4 Result of model test	23
Table 5 Numerical analysis method	26
Table 6 Input parameter for numerical model from laboratory tests	35
Table 7 Subsidence result of numerical model 1, 1-1	42
Table 8 Subsidence result of numerical model 2, 2-1	43
Table 9 Subsidence result of numerical model 3, 3-1	44
Table 10 Subsidence result of numerical model 1, 1-1, 1-2, 1-3	49
Table 11 Subsidence result of numerical model 2, 2-1, 2-2, 2-3	49
Table 12 Subsidence result of numerical model 3, 3-1, 3-2, 3-3	50
Table 13 Input parameter for numerical model(real scale)	52
Table 14 Subsidence result of real scale numerical model 4	55
Table 15 Subsidence result of real scale numerical model 5	55
Table 16 Subsidence result of real scale numerical model 6 (Y-axis)	56

List of Figures

Fig. 1 The lay out of test model	8
Fig. 2 Experiment process of test model	10
Fig. 3 Shape of each model	11
Fig. 4 Injection equipment	12
Fig. 5 Schematic diagram of model test	13
Fig. 6 Distance measuring equipment	14
Fig. 7 Subsidence for each model according to the tunnel excavation ...	15
Fig. 8 Grouting point for each model	16
Fig. 9 3D view of subsidence profiles for model 1, 2, 3 and 1-1, 1-2, 1-3 ..	20
Fig. 10 Subsidence result of test model (y=15cm)	22
Fig. 11 Grout bulb for each model	24
Fig. 12 Computation cycle of EFDM	27
Fig. 13 The Mohr-Coulomb failure criterion	29
Fig. 14 Tunnel analysis diagram by FLAC	30
Fig. 15 Plane view of each model	32
Fig. 16 3D view of each model	34
Fig. 17 Hist point (top view)	37
Fig. 18 Contour of Z-displacement of the model 1, 1-1	38
Fig. 19 Contour of Z-displacement of the model 2, 2-1	39
Fig. 20 Contour of Z-displacement of the model 3, 3-1	40
Fig. 21 Numerical modeling result of the model 1, 1-1	42
Fig. 22 Numerical modeling result of the model 2, 2-1	43
Fig. 23 Numerical modeling result of the model 3, 3-1	44
Fig. 24 Grouting region of model 1-1, 1-2, 1-3 (Top view)	46

Fig. 25	Grouting region of model 2-1, 2-2, 2-3 (Top view)	47
Fig. 26	Grouting region of model 3-1, 3-2, 3-3 (Top view)	48
Fig. 27	Subsidence reduction ratio for numerical model	51
Fig. 28	Each model of real scale	54
Fig. 29	Subsidence result for real scale model (after grouting)	57



A study on the settlement of underground excavation in the soft ground

Kim, Ki Ho

Department of Ocean Energy & Resources Engineering
Graduate School of Korea Maritime and Ocean University

Abstract

Excavation of underground space in soft ground implicate to the structure, such as subsidence. As a result, it has been acting as a serious risk to the stability of the roads and facilities.

Therefore, in order to stabilize the soil stabilization and reinforcement of the structure, we have been using a number of methods and injecting material. In this study, we compared and analyzed the amount of subsidence regarding the ground reinforcement during underground excavation in soft ground by performing model test. And three-dimensional numerical analysis was performed using FLAC 3D.

The subsidence was simulated numerically according to the tunnel excavation. The subsidence results of the model tests and numerical analyzes were relatively consistent. Thus comparing the ground subsidence by varying the reinforcement area on the numerical analysis was analyzed.

As a results, three-dimensional numerical simulation could be regarded to simulate better on the ground subsidence by various

kinds of underground excavation and it can be used as a material of subsidence prevention methods.

KEY WORDS: Soft ground; Subsidence; Reinforcement; Model test; Modeling



제 1 장 서 론

1.1 연구 배경

최근 국내 산업화에 따른 도로, 철도 및 다양한 구조물의 시공 및 건설 등에 의한 국토의 이용으로 지상공간이 부족한 실정에 이르렀다. 따라서 효율적인 지상공간에 대한 해결책으로 지하공간의 이용이 증대되고 있으며, 지하공간의 설계 및 시공기술 또한 발전하고 있다. 그러나 지반굴착공사는 기존의 구조물에 근접하여 시행되는 경우가 빈번하며, 연약지반의 출현 및 교통사정의 악화 등으로 어려운 시공 여건에서 수행되어 지고 있는 경우가 대부분이다. 따라서 지반굴착공사는 인근 지반 및 구조물에 영향을 미쳐 크고 작은 사고의 원인이 되며, 특히 도심지 내에 고층빌딩 및 지하철 건설과 같은 대형 공사가 많이 실시되어 지반침하에 대한 관심이 매우 높은 상황이다. 특히 우리나라와 같이 복잡한 지질조건을 갖는 지형적 지질학적 특성상 기존의 2차원적 해석만 실시할 경우 지반의 거동을 정확히 규명하기가 곤란한 문제가 발생하고 있다. 따라서 조사대상지역을 3차원적으로 정확히 구현함으로써 해석의 정확성을 기할 필요가 있다.

갱도 및 지하채굴적의 함몰, 지하수의 양수에 따른 암반 지지력의 상실 및 공동의 형성, 미고결층과 같은 연약지반의 자연적인 압밀현상 등으로 인하여 발생하는 지반침하는 도로 및 철도 등 국가 기간망의 안전성에 심각한 위험요소로 작용하고 있으며, 특히 인구가 밀집해 있는 지역에서는 가옥 및 시설물의 붕괴 요인으로 작용함에 따라 국민의 생활안전을 위협하고 있다(박의섭 외, 2006).

본 연구에서는 연약지반에서의 지하굴착과정에서 상부 지층 보강효과에 따른 지반침하를 모사하기 위한 모형실험과 유한차분법을 이용한 수치해석 방법을 이용하여 결과를 비교 분석하였으며, 모형실험에 사용된 약액은 경화시 무독성

일 뿐만 아니라 내화학적 및 내구성이 우수하고 시간에 따른 변성이 없는 에폭시 계열의 재료를 이용하였고, 초저점도의 에폭시 수지와 이에 맞는 경화제를 일정비율로 혼합하여 실험을 진행하였다. 또한 지반 침하 발생여부 및 지반침하량 산정을 3차원 수치해석을 통해 보다 정확하게 구현함으로써 신뢰성 있는 결과를 도출하고자 하였다.

1.2 국내외 지반침하 관련 연구 동향

현재까지 국내의 지반침하 우려지역에 대한 안정성평가는 대부분 지표지질조사 및 지하채굴도면 분석, 지표에서 발생한 침하 흔적조사 및 주민들과의 대화 등을 통하여 지반침하 우려지역을 선정한 뒤, 이 지역에 대한 시추조사와 각종 암반평가 등 지반 공학적 조사를 실시하여 그 결과를 토대로 2차원적 전산해석을 수행함으로써 지표시설물의 안정성 여부 및 지반침하의 발전가능성을 검토하는 형태로 수행되어 오고 있다. 그러나 지질조사의 정량적이고 객관적인 데이터의 부족과 지반 공학적 제반조사 결과가 전산해석에 충분히 반영되지 못하는 문제점들이 대두되고 있으며, 또한 지반침하가 발생한 후에야 조사 작업이 착수되는 수동적 접근방법이 이루어져 왔다.

박의섭 외(2006)는 국내에서 발생하고 있는 지반침하의 사례를 분석하여 지반침하 원인에 따라 사안별로 분류하고 이를 토대로 지반침하현상이 발생하고 있는 지역에 대한 DB를 구축, 통계분석을 실시함으로써 지질구조특성 및 인공 채굴적의 분포양상 등의 상호관계에 의한 지반침하 예측 기술을 개발하고, 국토에 대한 재해위험지도를 작성함으로써 지반침하 재해 발생가능성을 최소화 하고 재해 발생 시 사전에 경보할 수 있는 시스템을 구축하였으며, 최성웅(2009) 등은 폐 광산 지역에서의 지반침하 예측을 위한 퍼지추론 기법 적용을 연구하였다. 김명호(2003)는 근접굴착에 의한 기존 지하철 구조물의 거동연구를 통하여 터널 상부 근접굴착으로 인한 기존 지하철 터널의 안정성 분석을 유한차분 해석 program인 FLAC을 사용하여 서울 지하철 6호선 터널 구조물의 영향성 검토를 수행하였다. 임찬수(2006)는 도로터널 붕락원인 및 보강공법에 관한 사

레 연구를 하여 붕락원인을 밝히고 붕락원인별 보강대책을 수립하였다, 유영현 외(1997)는 국내 터널건설의 현황조사 및 교차터널의 설계법 개발 연구를 하였고, 오하진(2001)은 대 단면 교차터널 시공과 계측의 연구에서 우리나라 최초 대단면 교차터널이라 할 수 있는 진영터널의 수치 해석적 연구와 이를 계측치와 비교한 연구, 붕락구간에 대한 보강방안 연구를 진행 한 바 있다. 또한 송영수(2010)는 실내 모형시험을 통한 시멘트 그라우트의 지반침투성능을 분석하였으며 천병식 외(2005)는 시멘트 몰탈형 고압분사공법(MJM)에 의한 연약지반 보강효과에 관한 연구를 통해 보강된 연약지반의 공학적 특성을 규명하였다.

국외의 경우 Bieniawski, Z.T.(1984) 는 광산 갱도 및 교통 터널의 안전한 설계와 시공 및 그에 따른 상부암반의 안정성을 보장하기 위한 암반공학적 설계 기법에 대한 연구 결과 및 저서를 발표한 바 있다. Attewell and Woodman(2003)은 토사층에서 터널굴착으로 인한 지반침하에 관한 연구를 수행하였으며, 지반침하의 메커니즘을 규명하기 위한 또 다른 방법으로 수치해석적 연구도 다양하게 진행되어 왔다. Cundall, P.A.(2001)은 유한 차분 요소 및 개별 요소 기법을 이용하여 지반침하의 거동 특성을 수치 해석적으로 규명한 바 있다. Debasis(2003)는 폐광지역에서의 싱크홀 발생 규명을 위한 active-passive-active 유한 요소 기법연구를 통하여 수치해석 상에서 active-passive-active 유한요소들이 효과적으로 사용될 수 있음을 연구하였다. 한편 지반보강을 위한 그라우트의 지반침투 성능을 규명하기 위해 Srivastava, R.K. and Rac, K.S.,(1990)는 인공 절리에서 시멘트 그라우트에 의한 전단거동에 대한 연구를 수행하였으며, Kleyner, I.(1994) 등은 기초말뚝에서의 그라우트의 압력에 따른 영향에 대한 연구를 수행하였다. 또한 Schmidt, B.(1969)는 토사지반에 건설되는 3개의 터널 사례를 토대로 지표침하 특성을 분석하고 보강대책을 연구한바 있다.

따라서 본 연구에서는 상기 방법과는 달리 연약지반에서의 지하굴착과정에서 지반침하를 모사하기 위한 모형실험과 유한차분법을 이용한 수치해석 방법을 이용하여 결과를 비교 분석하였으며, 지반 침하 발생여부 및 지반침하량 산정을 3차원 수치해석을 통해 보다 정확하게 구현함으로써 신뢰성 있는 결과를 도출하고자 하였다.

제 2 장 기본 이론

2.1 지반 침하

침하(subsidence)는 지반이 점진적으로 가라앉는 현상을 의미하는 공학적 용어이나 지표의 갑작스럽고 순간적인 붕괴를 의미하기도 한다. 일반적으로 지하 채굴적에 의한 침하는 굴착이나 배수 등과 같은 채굴관련 활동으로 인하여 주변 암반에 응력 재분배가 일어나 채굴공동 주위의 응력상태가 공동의 천정, 바닥, 광주나 주변 암반의 강도를 초과함으로써 시작된다. 이러한 파괴로 인하여 지하 채굴지역의 천반이 붕락되고 붕락지역이 점차 상부로 발전하면서 지표까지 연결되어 침하가 발생한다.

침하는 table 1과 같이 크게 연속적 침하 형태인 트러프형 침하와 불연속적 침하 형태인 붕락형 침하로 구분할 수 있다. 트러프형 침하는 넓은 지역에 걸쳐 연속적으로 완만한 지표침하곡선을 발생시키며 침하량은 적으나 넓은 구역에 걸쳐 장기적으로 서서히 완만한 경사로 발생하는 특징을 가지고 있다. 붕락형 침하는 자중, 배수, 수압 등에 의한 압밀 및 압착, 지하수 유동에 의한 충전물 이탈, 천반 암반의 순간적인 붕락 등 다양한 발생 기구들로부터 생성된다 (Bruhn R.W, and R.C. Speck, 1986). 붕락형 침하는 갱내 천반의 파괴 후 일어나는데 천반파괴의 범위가 확장되어 미고결 표토층과 교우할 때까지 상부지층을 지나가는 경우에 해당된다. 붕락형 침하는 물그릇 모양, 깔때기 모양 혹은 수직면을 가지는 요지의 형태로 지표에서 발견되는데, 이는 생성원인, 표토층의 두께 및 성질, 채굴적 및 공동의 높이, 천반 내 존재하는 응력의 상태 등에 의해 결정된다. 지표상에 나타나는 붕락형 침하의 형태는 원형 혹은 타원형이 대부분이다.

Table 1 Type of subsidence

분류방식	침하 유형	침하의 성격	비교
발생시간에 따른 분류	활동성 침하 (active subsidence)	<ul style="list-style-type: none"> 채굴 작업시 침하현상이 발생하는 유형 	<ul style="list-style-type: none"> 비교적 얕은 심도에서 채굴적이 클 때 발생
	잔류성 침하 (residual subsidence)	<ul style="list-style-type: none"> 채굴작업 종료 후 일정시간 경과 후 침하현상 발생 부분적인 채굴에서는 몇 십 년 후에 발생하기도 함 	<ul style="list-style-type: none"> 채광 회수율이 높은 경우에 침하가능성 높음
침하형태에 따른 분류	연속형 침하 (continuous subsidence)	<ul style="list-style-type: none"> 대체로 넓은 지역에 걸쳐 완만한 경사로 지표가 전반적으로 기울거나 타원형으로 침하하는 현상 	<ul style="list-style-type: none"> 침하과정의 초기 또는 오랜 시간에 걸쳐 조금씩 잘 인지되지 않을 만큼의 침하량을 보이는 경우도 있음
	불연속형 침하 (discontinuous subsidence)	<ul style="list-style-type: none"> 급 경사층에서 발생하는 경향이 있으며, 갑자기 지표가 함몰하는 형태로 침하가 발생하는 유형 	<ul style="list-style-type: none"> 인명이나 지표시설물에 심각한 손상을 초래할 수 있고 발생 시기에 대한 예측도 어려운 침하의 형태

2.2 지반침하의 매커니즘 분석

2.2.1 수치해석에 의한 침하영향 분석

지반침하를 예측하는 방법은 크게 경험적 방법(empirical method), 축소모델(physical model)에 의한 방법 및 수치해석방법(numerical method)으로 구분된다. 경험적 방법은 기존의 침하에 대한 연구로부터 얻은 자료를 분석하여 미래의 침하를 예측하는데 사용된다. 이 방법은 초기의 계측자료가 있는 지역에서

향후 발생할 침하를 예측하기에는 좋은 방법이 될 수 있으나, 기존의 계측자료가 있어야만 하며, 계측된 자료를 바탕으로 도해적 확장을 통해 침하를 예측하기 때문에 일반적인 해법으로 사용하기에는 한계가 있다.

축소모델에 의한 방법은 석고와 같은 인공재료를 이용하여 만든 축소된 모형을 필요로 한다, 이 방법은 비용이 많이 드는 반면에 지반침하의 메커니즘을 이해하는데 도움이 된다.

이들에 반해 수치해석방법은 지배방정식, 즉 평형미분방정식, 변형률-변위관계식, 응력-변형률관계식과 강도-응력관계식의 수치적 근사에 토대를 두고, 최종적으로 분석된 영역에서 유도된 변위와 응력을 계산한다. 하지만 수치해석법에서 중요한 입력변수들인 지반의 특성을 구하기 위해서는 많은 노력과 비용을 필요로 한다. 초기에 수치해석방법에 의한 침하예측은 암반의 실제거동에 대한 불완전한 이해로 인하여 다소 문제점이 있었으나 암반의 파괴 후 거동, 현지 초기응력의 측정 및 평가와 치수효과(scale effect) 등과 같은 암반의 실제거동을 그대로 모사하고자 하는 많은 연구가 지난 수십 년간 수행되어 이러한 문제점을 대부분 극복한 상태이다. 지반침하 현상을 수치 해석적으로 규명하는 데 있어 지반 즉, 토피의 거동해석이 주요 관심사항이므로 표면값의 형태로 문제를 해결하는 경계요소법(BEM)은 부적합하며, 개별요소법(DEM)의 경우 많은 절리들이 존재하는 지반조건에서 암반블록의 미끄러짐 또는 탈락 등의 암반거동이 중시되는 해석이므로 일반적인 지표침하 모델링에서의 주된 관심사가 아니다. 이와 달리 유한차분법(FDM)은 대변형 해석이 가능하므로 비선형 문제인 침하모델링에 가장 적합한 것으로 판단된다.

2.3 지반보강을 위한 주입 공법

도심지 지하철건설공사나 해안에 인접한 연약지반에서의 구조물은 물론 건물의 고층화에 따른 대규모 지하굴착이 이루어지고 있으며, 이러한 공사 도중 터널붕락, 주변지반 및 인접건물의 부등침하, 측방유동에 의한 구조물변위 등 건설현장에서 대규모 안전사고가 빈발하여 사회문제화 되고 있다. 이러한 안전사고에 대비하여 여러 가지 지반주입보강신공법이 개발되고, 새로운

터널공법 및 터널 보조공법이 국내 지하철건설현장에서 널리 쓰여 지고 있으며 큰 성과를 보고 있다. 주입공법은 국내외 건설현장에서 지반보강용으로 많이 쓰여 지고 있으나 환경문제 등으로 크게 제약을 받게 되었고, 사용될 수 있는 약액도 공해성이 없는 물유리계약액으로 한정되었으나 근래에는 우레탄 등의 약액은 공해문제가 해결되어 일본을 위시한 선진국에서 구조물 및 지반보강용으로 많이 쓰여 지고 있다(천병식, 1997). 본 연구에서는 경화시 무독성일 뿐만 아니라 내화학적 및 내구성이 우수하고 시간에 따른 변성이 없는 에폭시 계열의 재료를 이용하여 지반보강의 주입재로 사용하였다. 이러한 공법은 터널 내나 지표로부터 라이닝 배면과 노반 아래 부분의 공극 또는 주변 지반에 천공하여 주입관을 설치하고 이 관을 통해 혼입한 주입재(grout)를 주입 펌프로 압입하여 고결하는 방법이다.

2.4 에폭시 수지의 조성 및 특성

에폭시 수지의 종류는 점성이 있는 액상에서부터 녹는점이 높은 고상까지 물리적인 양상이 다양하다. 에폭시란 통칭 “산소를 사이에 둔 화합물”이라는 뜻을 가지며, 구조를 갖는 화합물의 총칭이다. 에폭시 수지를 단독으로 사용하는 일은 없으며, 경화제를 다시 첨가하여 열경화성의 물질로 변화시켜 사용하게 된다. 에폭시 수지와 경화제에는 많은 종류가 있고, 종류에 따라 수지나 경화제의 특성이 다르고 혼합·경화시 경화된 수지의 특성이 달라지기 때문에 이의 혼합조합과 여러 재료의 배합이 매우 중요한 과정이라고 할 수 있다(정성호, 2007). 본 연구에서는 암반안정용 주입재로서의 특성을 만족시키기 위해 초저점도의 에폭시 수지와 각각에 맞는 경화제를 일정비율로 혼합하여 실험을 진행하였다.

제 3 장 실내모형실험

3.1 실험 방법 및 내용

3.1.1 모형 토조 및 모형 지반 제작

모형 토조의 크기는 가로×세로×높이를 각각 $500\text{mm} \times 300\text{mm} \times 200\text{mm}$ 로 하고, 지반을 조성하는 재료에 의해 토조가 파괴되지 않기 위해 10mm 두께의 투명 아크릴로 모형 토조를 제작하였다. 투명 아크릴은 벽면의 마찰을 최소화할 수 있을 뿐만 아니라 지하공동 굴착 시 상부에서의 지반침하 양상을 육안으로 확인이 가능하며 상부는 개방되어 실험이 용이하도록 제작하였다. 본 실험에서는 터널의 배치에 따른 지반침하를 분석하고자 모형 토조에 직경 30mm의 공동 모형을 제작 하였다. 토조의 규격은 지하공동 굴착에 따른 영향을 받지 않는 범위로 설정하기 위하여 공동 모형 직경의 3배 이상으로 하였고 또한 좌·우측의 여유를 주어 가로축의 길이 및 세원은 Fig. 1과 같다.

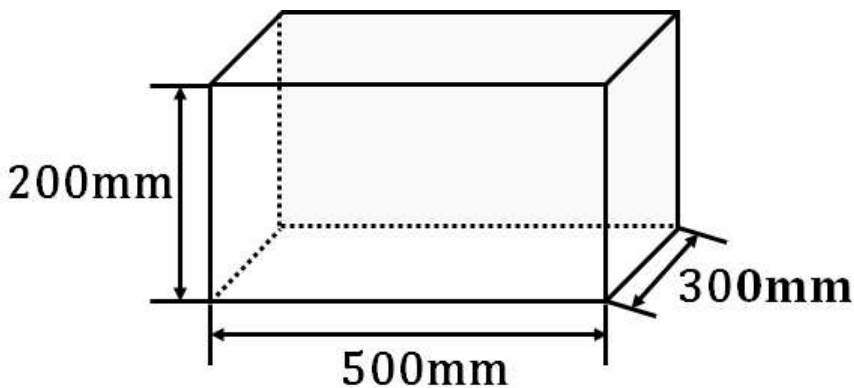


Fig. 1 The lay out of test model

모형 지반에는 연약지반에서의 지하공동을 모사하고자 풍화암 파쇄대 지반과 풍화토 지반을 대상으로 모형 지반을 조성하였다. 쇄석과 모래를 혼합하여 풍화암구간을 모사하였고 풍화토 지반은 모래로 모형 지반을 조성하였다. 이때 모형 지반 중 모래는 공중 낙하법으로 제작을 하였으며 지표에서 약 700mm에서 낙하시킬 때 상대밀도는 35%가 확보되는 것으로 나타났다. 지하공동의 위치는 풍화암 구간과 풍화토 구간의 경계로써 실험을 구성하였으며, 시험에 사용된 시료의 물리적 특성은 table 2와 같다.

Table 2 Property value of the model ground

구분	통일분류	함수비(%)	비중(G_s)	단위중량(g/cm^3)	상대밀도(%)
풍화토(모래)	SP	1.5	2.63	1.52	35
풍화암(쇄석)	GW	3.2	2.92	2.12	35

모형지반은 Fig. 2와 같이 준비된 아크릴에 바닥에서부터 높이 70mm정도로 쇄석을 조성하고 터널 모형으로 원형의 아크릴 파이프를 양단 끝에 위치시킨 후 모래를 타설하였다. 모래가 타설된 후에는 지반을 고르게 하기 위해 평탄화 작업을 실시하였다.

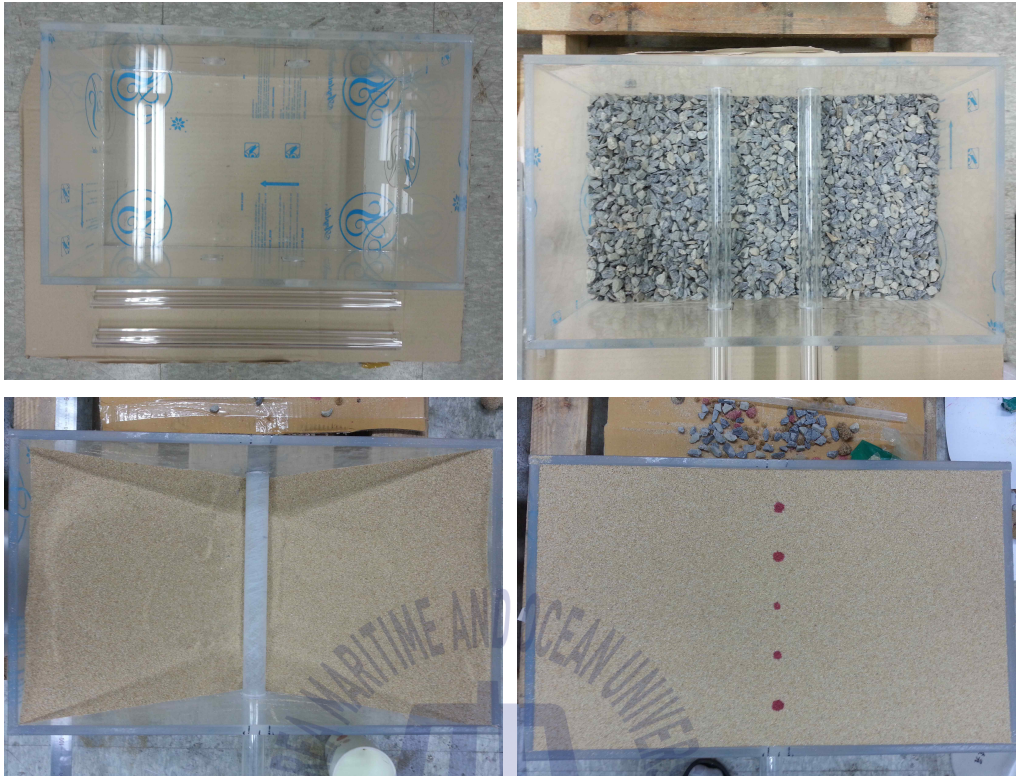
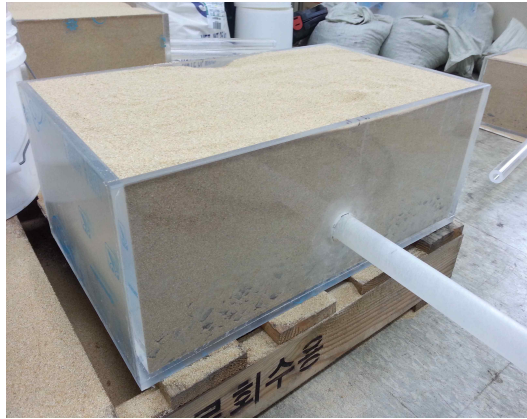


Fig. 2 Experiment process of test model

3.1.2 모형 터널 설계

지하 공동 모형은 Fig. 3과 같이 단일공동, 복수공동, 90° 로 교차되는 교차공동의 총 3가지 모델로 구성하여 모형실험을 하였다. Model 1은 지하공동의 직경을 30mm, 공동의 심도는 상부로부터 115mm, 길이는 300mm인 경우이며 model 2는 지하공동의 직경 및 심도는 model 1과 동일하며, 공동 폭간거리는 90mm로 설계를 하였다. Model 3의 경우는 model 1과 직경 및 심도는 동일하며, 교차되는 공동의 길이는 500mm로 실험을 진행하였다. 각 모델 모두 30mm로 이루어진 원형의 아크릴 파이프를 구현을 하였으며, 아크릴 파이프를 인발하면서 지하공동의 체적만큼의 굴착을 모사하고자 하였다.

Model 1



Model 2



Model 3

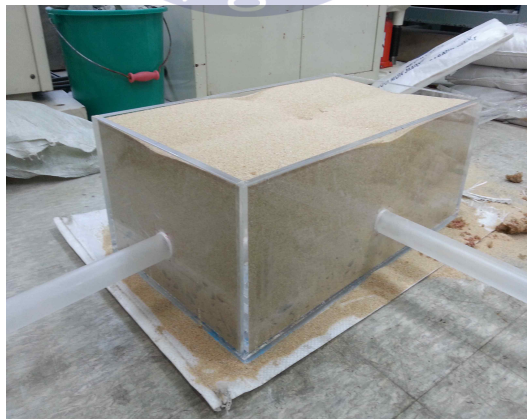


Fig. 3 Shape of each model

3.1.3 지반 보강을 위한 주입장치 및 주입제

지반 보강을 위해 조성된 모래 지반에 보강재를 주입할 수 있는 장치는 크게 노즐, 호스, 약액통, 모터 및 펌프로 구성되어 있으며, 압력을 일정하게 유지시키기 위하여 조절밸브 또한 부착하였다. 약액통의 용량은 1.5L이며, 장비는 최대 $350\text{kg}/\text{cm}^2$ 의 압력에 견딜 수 있게 제작하였으며, 조작 스위치 및 기타 장치 등은 Fig. 4와 같다. 본 실험에서는 지반을 보강하는 구역 당 $0.9\text{l}/\text{min}$ 의 속도로 주입을 하였으며 평균 30ml 의 크기로 구근이 형성되게 실험을 진행하였다.



Fig. 4 Injection equipment

또한 연약지반의 지반 침하 현상을 억제하고자 경화시 무독성일 뿐만 아니라 내화학적 및 내구성이 우수하고 시간에 따른 변성이 없는 에폭시를 지반 보강 주입제로 사용하였다. 본 실험에서 사용된 에폭시 수지는 초저점도로 주제와 경화제의 비율을 3:1로 하여 교반기를 통하여 충분히 교반시킨 후 약액통에 주입을 하였다. Table 3은 실험에 사용된 에폭시 수지의 특성이며, Fig. 5는 실험 모형을 개략적으로 나타낸 그림이다.

Table 3 Property value of the epoxy resin

항목	기준치	항목	기준치
배합비	주제:경화제(3:1)	접착강도	$6.0N/mm^2$ 이상
외관색상	투명색(혼합시)	인장강도	$15.0N/mm^2$ 이상
점도(mpa · s)	130 ± 50	경화수축률	3%이하
가사시간	상온 60분 \pm 10	인장파단시 신장률	10%이하
지축경화시간	상온 14시간 \pm 5	완전경화시간	상온 24~36시간

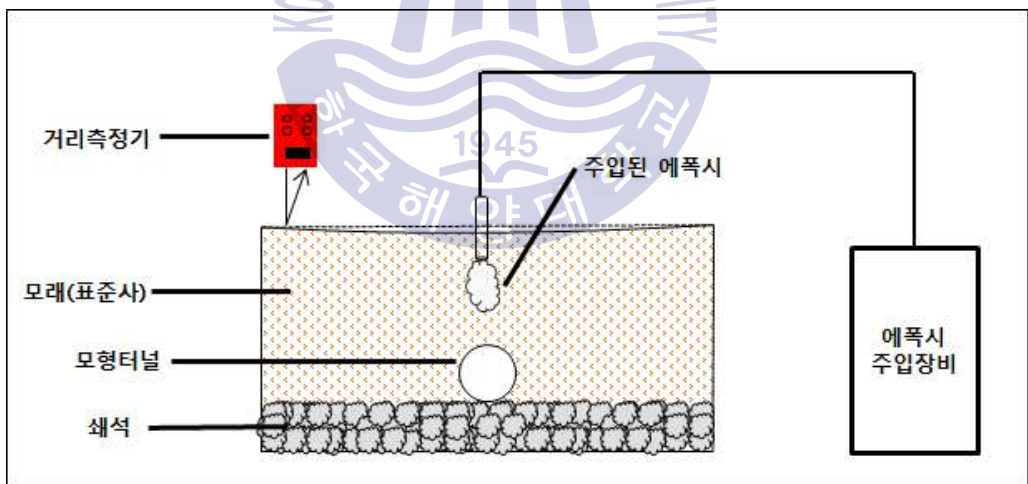


Fig. 5 Schematic diagram of model test

3.2 모형 실험 과정 및 실험 결과

지하공동 배치에 따른 지표에서의 지반침하양상을 확인하기 위해 Fig. 6과 같이 장비를 이용하여 각 포인트에서의 지표 침하를 측정하였다. 지표 침하는 지하공동 채굴적에 의한 붕괴 만큼 붕괴가 되어 지표로 전이되기 때문에 이미 만들어진 공동 모형에 인발을 가하여 채굴적 붕괴에 의한 침하를 모사하였다. 이때 지반침하의 측정은 1mm까지 측정이 가능한 거리측정기를 이용하여 그림과 같이 가로 X-축, 세로 Y-축에 따라 지하공동 상부에 위치하는 원 지반에서 Z 위치와 파이프의 인발로 인해 발생하는 지표에서 Z의 상대적인 위치의 차이를 이용하여 측정하였으며, X, Y-축 모두 50mm 간격으로 각 지점에서 5회씩 측정하여 평균 Z값을 구하였다.



Fig. 6 Distance measuring equipment

각 실험모델에 대해 지반 보강 전 지하공동 굴착시 지반침하에 관한 실험 사진은 다음 Fig. 7과 같이 위에서부터 단일 공동, 복수공동, 교차공동의 굴착으로 인한 지반 침하의 모습이다.

Model 1



Model 2



Model 3

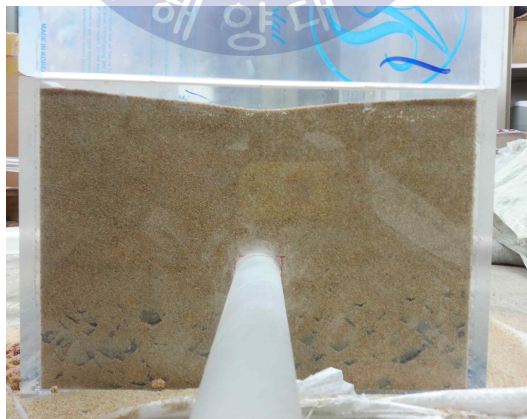


Fig. 7 Subsidence for each model according to the tunnel excavation

본 모형실험에서는 Fig. 8과 같이 각 포인트에 대해 지반 보강재로 사용될 에폭시의 주입속도를 평균 15ml/sec 로 일정하게 하여 50mm 간격으로 주입을 하였으며, 형성된 구근의 평균 직경과 높이는 30mm이며, 이는 차후에 수치해석에서도 동일한 제원으로 사용되었다.

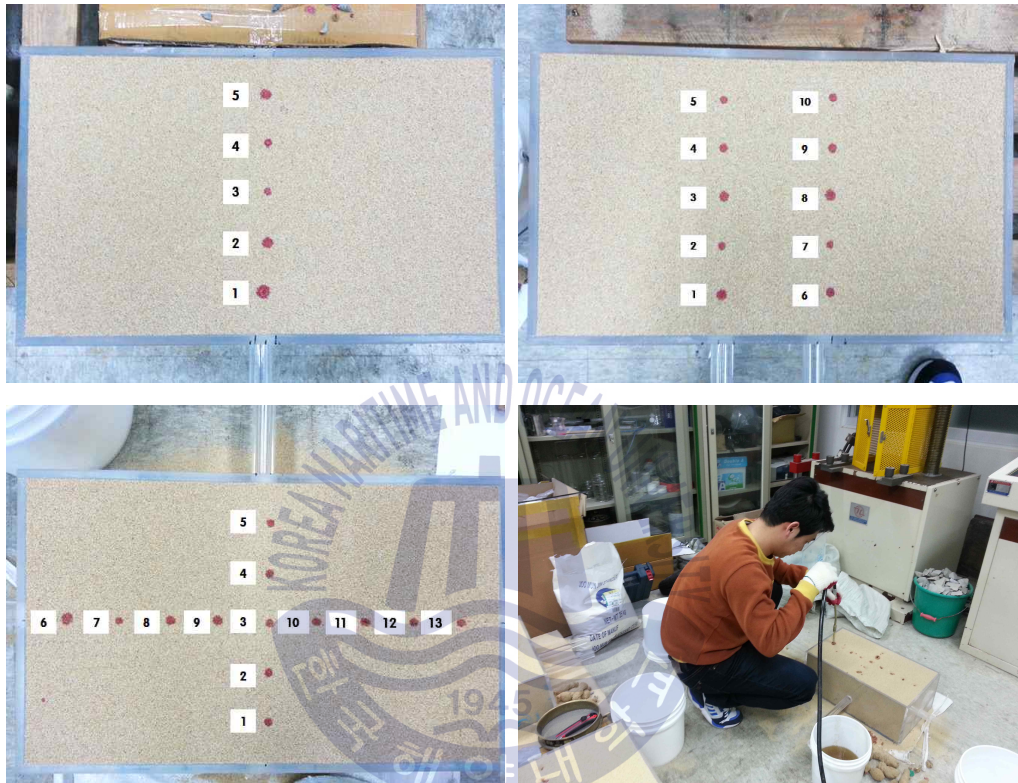


Fig. 8 Grouting point for each model

Model 1의 단일공동의 경우 지하공동 굴착에 따른 지하공동 상부에서의 최대 지반 침하량은 0.8cm로 나타났으며, 공동이 위치한 지점에서부터 거리가 멀어질수록 침하량은 감소하는 것으로 확인되었다. 또한 지반보강에 의한 지반침하량은 0.7cm로 측정되었으며, 이때 지반보강재의 주입에 따라 지반침하가 감소하는 것을 확인할 수 있었다.

Model 2의 복수공동의 경우 공동과 공동 사이의 거리는 90mm로 설계를 하였으며 지반보강을 하지 않은 상태에서 지하공동을 굴착하였을 때는 좌, 우측 공동의 상부에서의 평균 침하량이 1.0cm로 측정되었으며, 에폭시를 주입하여 지

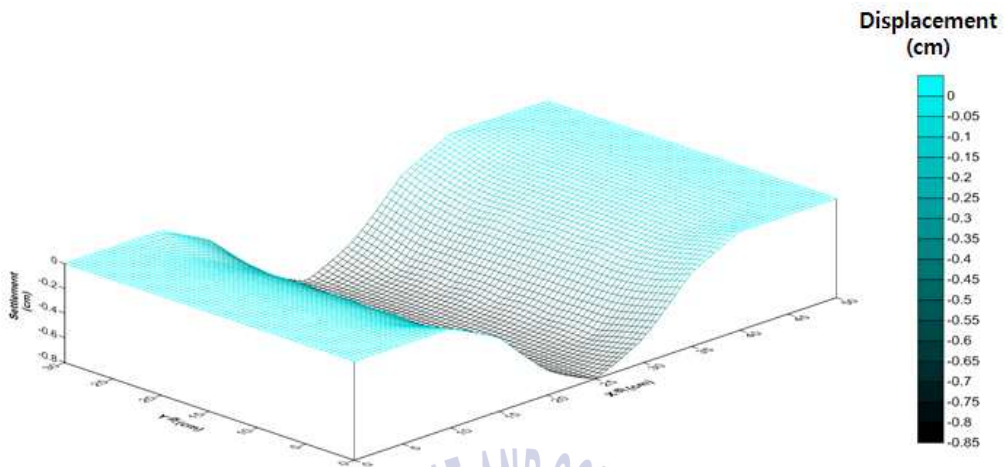
반을 보강하였을 경우에는 좌, 우측 지하공동 상부에서의 평균 침하량은 0.9cm로 측정되었다.

Model 3은 교차공동의 경우로 교차되는 지점에서 가장 큰 침하량인 1.8cm가 발생하였으며, 지반보강을 한 경우 model 1, model 2와 마찬가지로 0.1cm의 침하감소효과를 확인하였다.

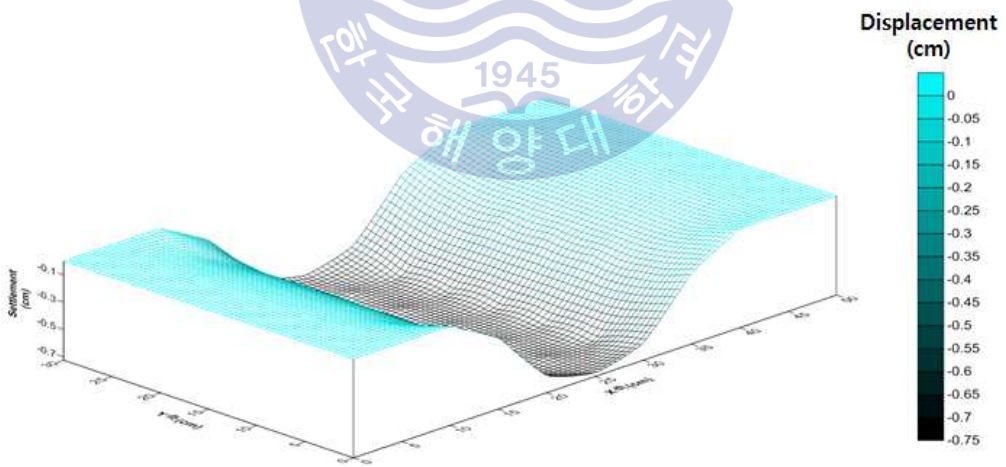
지반보강 전·후의 차이를 육안으로 식별하기 어려운 점을 감안하여 거리 측정기로 측정한 Z값에 대해 3차원으로 나타낸 결과는 다음 Fig. 9와 같이 각 모델에 대해 지반 보강 전을 model 1, 2, 3 으로 표현을 하였고, 지반보강 후는 model 1-1, 2-1, 3-1 로 하였다.



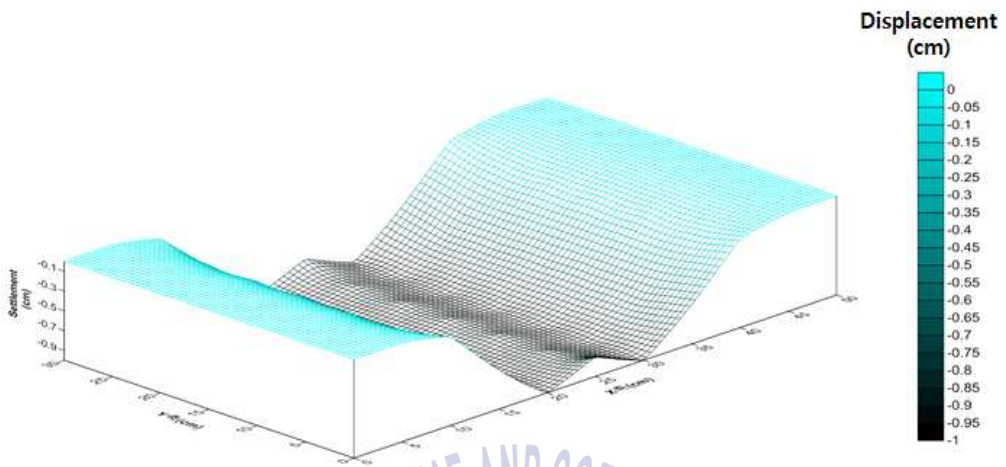
Model 1



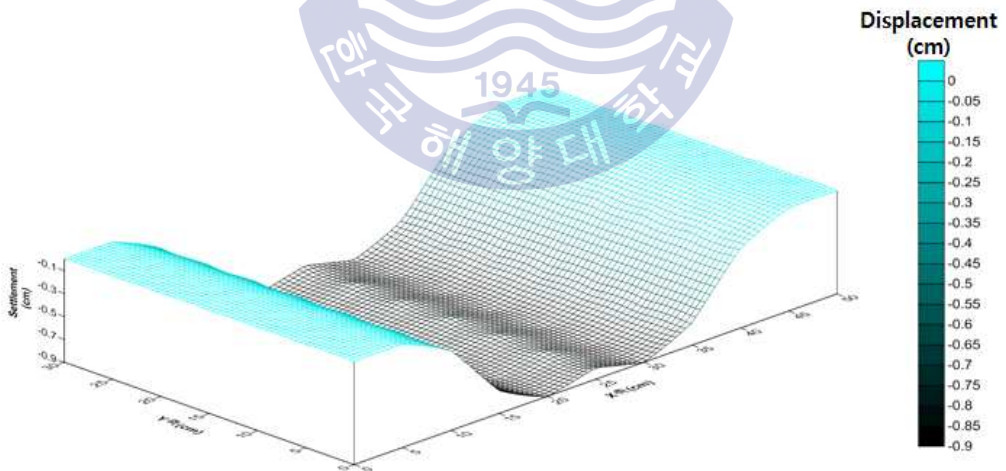
Model 1-1



Model 2



Model 2-1



Model 3

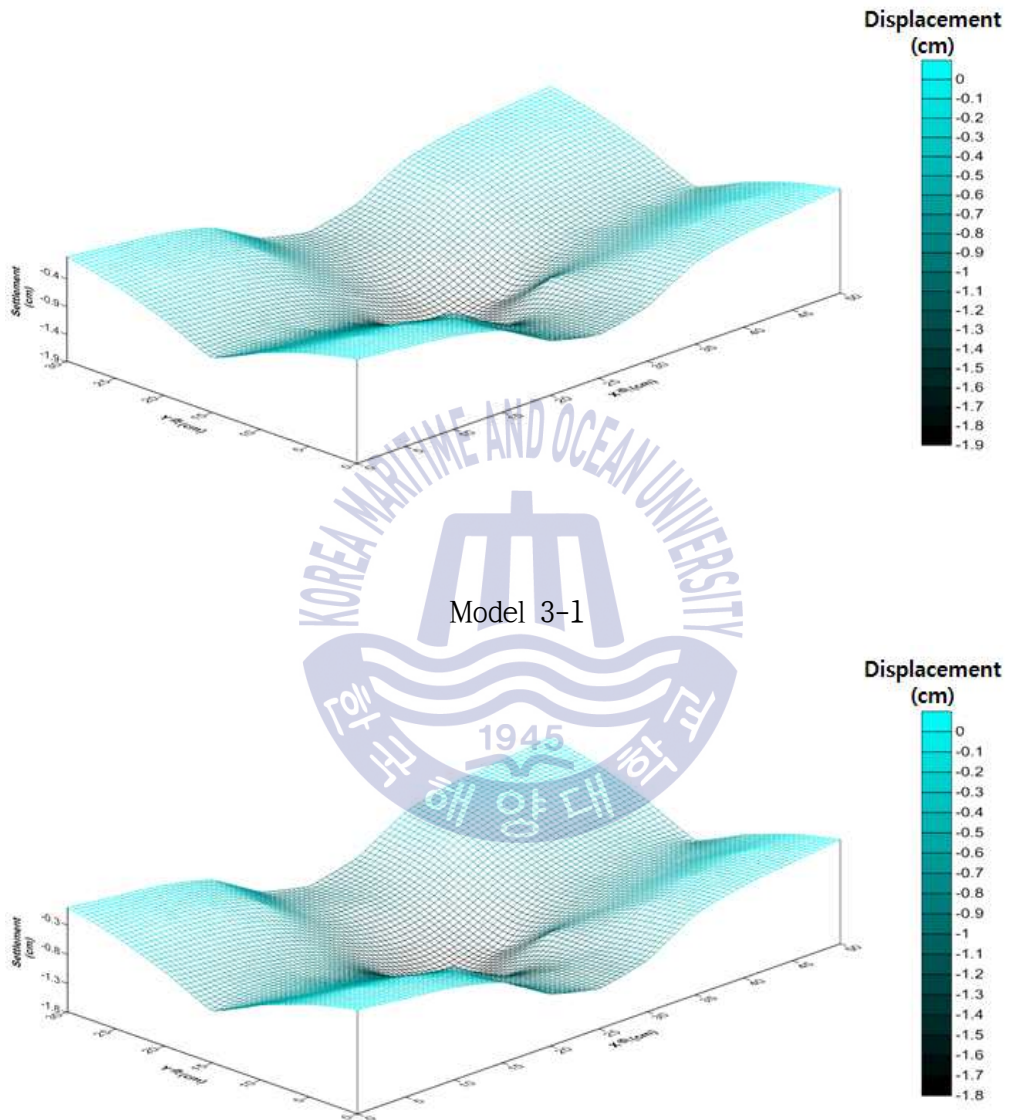
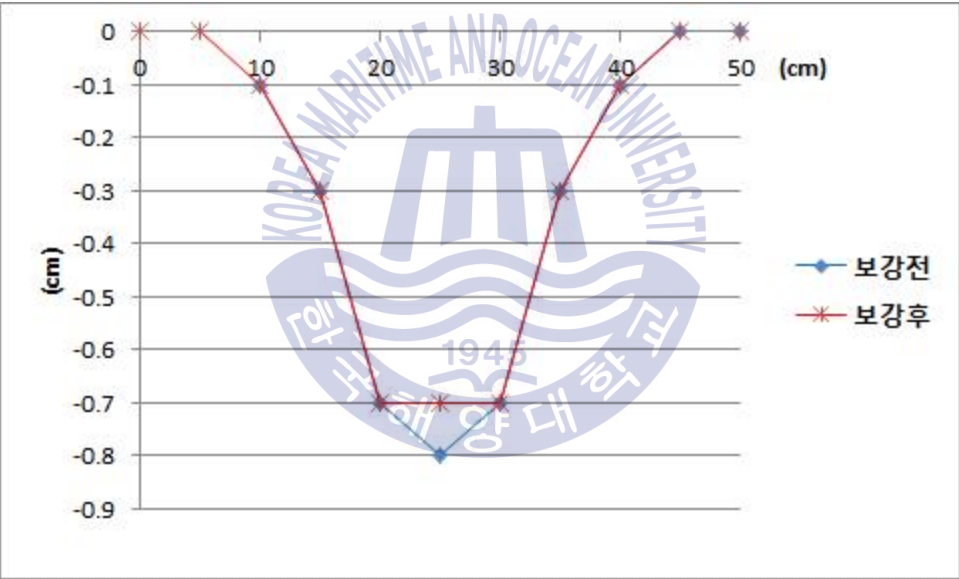


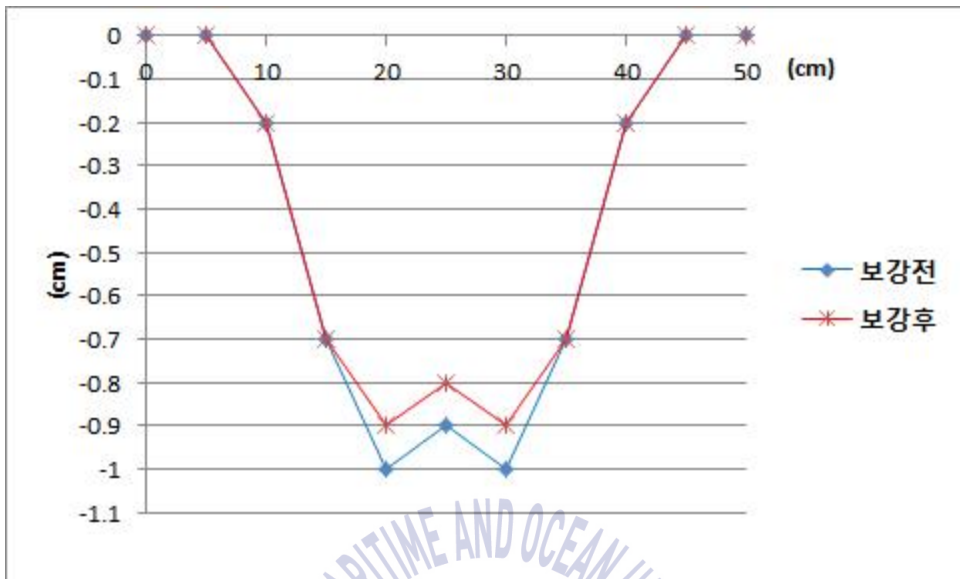
Fig. 9 3D view of subsidence profiles for model 1, 2, 3 and 1-1, 2-1, 3-1

Y축의 15cm되는 지점에서의 보강 전·후의 지반침하량에 대한 각 모델의 대표 단면도를 나타내면 아래 Fig. 10과 같다. Model 1, 2, 3모두 지하공동 상부에서 지반보강에 의해 0.1cm의 침하 감소 효과를 확인 할 수 있었고, model 3의 경우 Y=15cm 지점에서 공동이 교차됨으로 인하여 model 1, 2에 비해 지반침하가 더 크게 발생하는 것을 확인 할 수 있었다. 지반 보강 전·후 model 1은 X-축으로 약 30cm의 범위에서 0.1cm 이상의 지반침하가 발생되었고, model 2는 X-축으로 약 30cm의 범위에서 0.2cm 이상의 지반침하가 발생되었다. 또한 model 3은 X-축 전 범위에서 0.8cm 이상의 지반침하가 발생함을 확인 하였다.

Model 1, 1-1



Model 2, 2-1



Model 3, 3-1

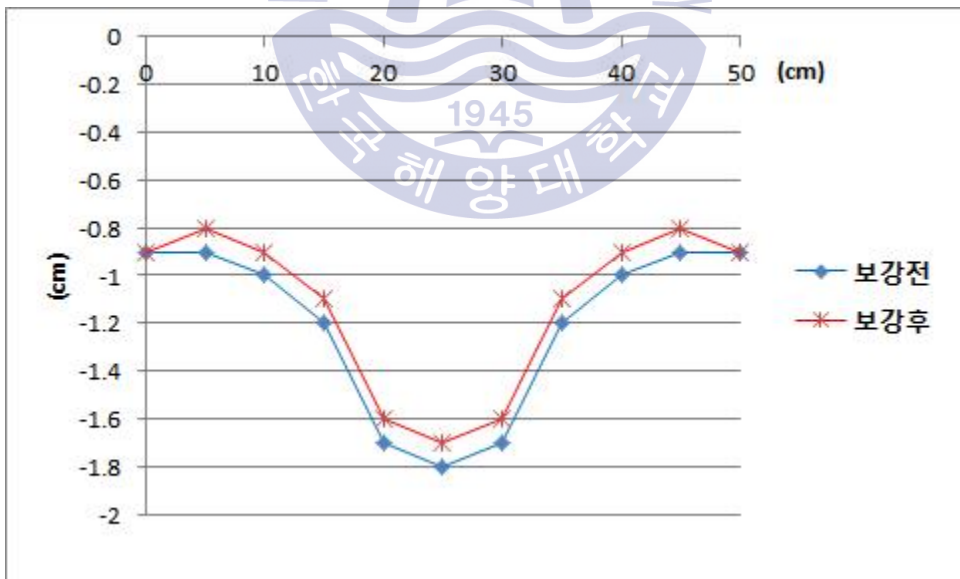


Fig. 10 Subsidence result of test model (y=15cm)

모형 실험에서의 지반침하 결과를 정리하면 table 4와 같다.

Table 4 Result of model test

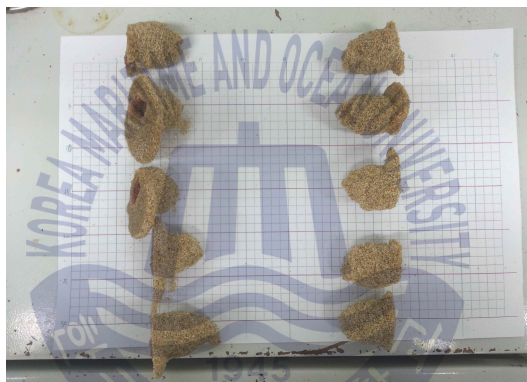
	Type of tunnel	Average subsidence (mm)	Max. subsidence (mm)	Average subsidence after the grouting (mm)	Max. subsidence after the grouting (mm)	Injection flow rate (ml/sec)
Model 1	Single	2.7	8	2.6	7	15
Model 2	Double	4.2	10	4.0	9	
Model 3	Cross	12	18	11	17	

본 실험에서 Model 1보다는 model 2에서의 평균 지반 침하가 더 크게 일어났고, 교차되는 model 3에서는 세 개의 모델 중 평균 침하 발생량이 가장 크게 발생한 것을 확인하였다. 이는 지반 침하가 굴착되는 지하공동의 체적에 영향을 받기 때문이라고 사료된다. 또한 지반 보강을 위한 주입재의 속도는 15 ml/sec로 약 2초가량 주입이 이루어졌고 model 1의 경우 X=25cm 지점인 터널 상부의 지표에서 Y-축 방향으로 총 5개의 구간에 지반보강을 실시하였고, model 2의 경우는 좌·우측 지하공동의 상부인 지점에서 총 10개 구간, model 3의 경우 지하공동 중심에서는 model 1과 같이 총 5개의 구간과, Y=15cm 지점에서 교차되는 교차지점 상부의 지표에서 8개의 구간에 지반보강을 실시하였다. 그 결과 Fig. 11과 같이 구근이 형성됨을 확인하였다. 하지만 모든 구근의 형상이 일정하지 않아 구근의 부피는 부력이용방법을 통하여 계산한 결과 평균 27cm³로 계산이 되었다.

Model 1-1



Model 2-1



Model 3-1

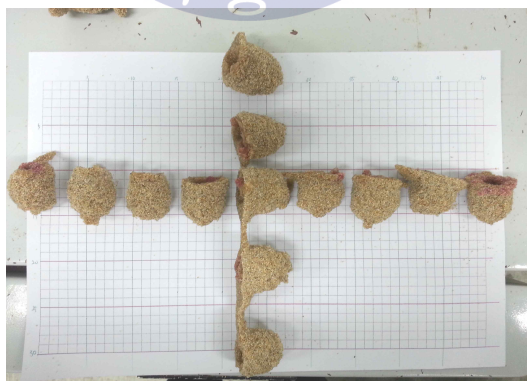


Fig. 11 Grout bulb for each model

제 4 장 수치해석법

터널과 같은 일반적인 지반공학에 대한 문제는 그 구성 재료의 다양한 성질과 재료 내에 존재하는 간극과 지층, 지하수위, 불연속면 등의 불균일성 때문에 타 분야에서 볼 수 없는 복잡성을 가지고 있다. 이러한 복잡한 요인을 모두 고려한 터널 구조해석용 프로그램의 개발은 현 단계로서는 극히 어려운 실정이다. 그러나 과거에 지반재료의 구성 법칙과 항복조건, 구조물의 기하학적인 형상과 경계조건 등을 단순히 모형화한 경우에도 지반의 역학적 특성에 대응한 탄성, 점·탄성 및 소성의 이론식을 푸는 것이 어려웠던 것에 비하면 이제는 선 처리 장치와 후 처리 장치의 비약적 발전으로 복잡한 구조의 모델을 제작할 수도 있고 해석결과도 육안으로 쉽게 파악이 가능하도록 표현할 수도 있게 되었다. 특히 3차원 해석을 자유자재로 할 수 있어서 보다 실제에 가까운 암반거동을 시뮬레이션 하는 것이 가능해졌다. 터널에 대하여 수치해석을 실시함으로써 터널의 굴착주변에 발생된 변형 및 침하의 예측, 타구조체의 영향을 고려하여 터널유지의 한계선을 설정하여 지보재, lining의 설계자료로 활용하고, 역 해석을 통하여 계측에서 얻어지는 실제적인 parameter를 획득, 계측된 해석 단면과 유사한 단면에서의 거동예측과 지반 parameter를 결정할 수 있다(한국암반공학회, 2005).

4.1 수치해석법의 종류 및 특징

암반을 해석하기 위한 수치해석 방법에는 크게 유한요소법, 유한차분법, 경계요소법, 개별요소법으로 나눌 수 있다. 그 중 암반을 연속체로 가정한 접근방법으로는 유한요소법(FEM), 유한차분법(FDM), 경계요소법(BEM)이 있으며 불연속체로 가정한 접근방법으로는 개별요소법(DEM)이 있다. 이러한 수치해석법에 대하여 table 5에 간략하게 소개하였다.

Table 5 Numerical analysis method

구분	내용	장점	단점
유한 요소법(FEM)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 각 요소를 기하학적인 크기로 분할하고 초기 암반상태의 변화에 따라 응력, 변형 해석을 실시하는 implicit 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 고도의 복잡화된 암반 및 터널 특성의 해석 가능 ▪ 굴진에 따른 시각적인 영향 고려가능 ▪ 재료의 불균질성을 해석 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 대용량의 Computer 및 저장 용량 필요 ▪ 경계요소 설정이 명확하지 않음
유한 차분법(FDM)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 요소를 기하학적 크기로 분할하며, 미지요소 해석법은 Explicit ▪ 전체 행렬을 구성할 필요가 없으며 불균형력에 따라 미소변화 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 시간진행과 같은 거동해용이 ▪ 행렬을 구성하지 않기 때문에 Computer 용량이 작음 ▪ 동적계산에 효과적 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 정적문제에 있어서 타 수치해석보다 소요시간이 길다
경계 요소법(BEM)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 굴착경계만으로 문제영역의 생성이 가능하고 선형방정식을 편미분방정식의 적분으로 해석하며 굴착경계는 외부경계로 적용 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 방정식 생성이 상대적으로 작다 ▪ Computer 용량의 소형화 ▪ 입·출력 과정이 간단·용이 ▪ 복잡한 건설공정이나 재료의 시간의존성 고려 곤란 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 암반의 선형, 연속암반 거동에 국한 ▪ 시간에 의한 효과를 Model 화 하기 곤란
개별 요소법 (DEM)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 연속체 Model 화 하지 않고, 개별적 Block으로 생성하고 암반체 변형이 강체 Block 으로 생성하고 암반체 변형이 강체 Block 사이의 절리를 따른 이동에 지배 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 절리도가 높은 Model에 대단히 효과적 ▪ Computer 용량이 비교적 작음 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 절리의 위치, 방향의 입력이 계산에 필요하므로 이러한 Data 입수의 곤란

4.1.1 유한차분법

유한차분법(FDM, Finite Difference Method)은 물리적 시스템의 근사해를 구하는 가장 오래된 수치해석기법 중의 하나이다. 유한차분법은 일련의 지배방정식들을 대수적인 차분식으로 변환하여 해를 구한다. Fig. 12는 역학적 문제에 대한 명시적 유한차분법(EFDM, Explicit FDM)의 일반적인 해법 절차를 보여주고 있다. 우선 운동방정식으로부터 응력과 힘을 사용하여 새로운 속도와 변위를 구한다. 새로 구한 속도로부터 변형률 속도를 구하고 변형률속도로부터 새로운 응력을 구하며 이 과정이 반복된다. 여기서 중요한 것은 Fig. 12의 각 박스는 이미 계산된 속도를 가지고 각 요소에 대해서 응력을 계산한다. 이러한 작업 중에는 속도는 고정된다. 즉, 새로 계산된 응력이 속도에 영향을 주지 않는다는 것이다. 이는 비현실적으로 보이나 모든 재료에는 정보가 전파되는 최대속도가 존재하므로 계산스텝을 충분히 작게 하여 이 계산스텝 동안에 정보가 한 요소에서 다른 요소로 전달될 수 없도록 하면 된다.

이러한 방법이 명시적(explicit) 방법이며 중심개념은 계산상의 전파속도가 항상 물리적인 전파속도보다 앞서간다는 것이며 이로 인해 계산스텝동안 고정된 기지의 값에 대해서 방정식들이 적용되는 것이다. 이러한 방법은 요소내의 응력을 변형률로부터 계산할 때 비선형 구성방정식이라 할지라도 반복 절차가 필요 없다는 장점이 있다.

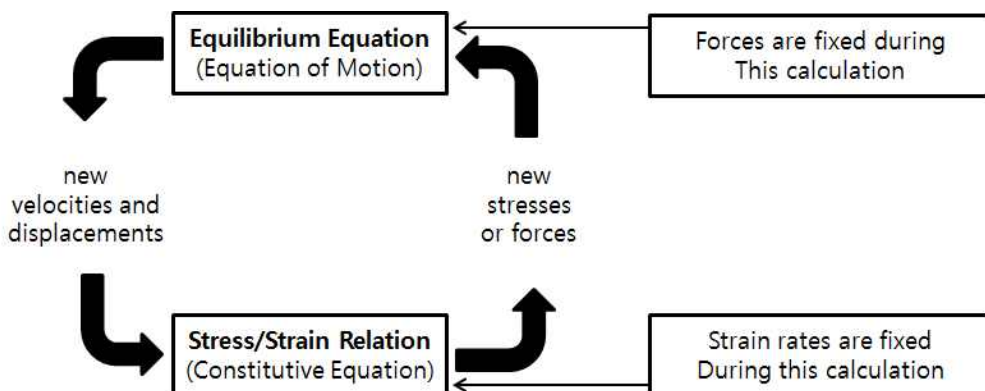


Fig. 12 Computation cycle of EFDM

또한 전체 강성행렬이 필요하지 않으므로 대변형 모드에서 각 계산단계마다 좌표를 갱신하는 것이 어렵지 않다. 추가된 변위가 좌표에 첨가되므로 격자망이 이동하고 변형한다. 이러한 해석을 Lagrangian 기법이라 한다. 이에 반해 Eulerian 기법은 고정된 격자망에 대해 상대적으로 이동하고 변형하는 기법이다. 대부분의 고체역학 문제는 Lagrangian 기법을 이용한다(한국암반공학회, 2005).

4.1.2 FLAC

지반의 안정성 평가를 위한 수치해석 프로그램은 이미 검증된 방법인 ITASCA 사의 FLAC(Fast Lagrangian Analysis of Continua)3D를 사용하였다. FLAC 3D는 공학적 계산을 위해 제작된 3차원 음해 함수 유한차분(explicit finite difference)프로그램이다. 또한 3차원 연속체 공간을 유한 차분망(finite difference mesh)으로 원하는 만큼 자세하게 분할하여 임의의 위치에서 각각의 지배방정식의 해(Solution)를 구할 수 있으며 암석역학 및 토질역학 분야에서 사용의 편리함과 다양한 기능 및 해석의 정확성 때문에 많이 사용되는 코드이다. 이 프로그램은 항복한계에 도달하여 소성 유동을 일으키는 토질, 암반 또는 다른 재료의 거동을 모사할 수 있다. 재료들은 사용자의 목적에 맞는 형상을 구현하는 요소 또는 구역으로 표현된다. 각 요소는 하중 및 경계조건에 대하여 주어진 선형 및 비선형 응력-변형을 법칙에 따라 거동한다. 재료는 항복될 수도 있으며 그리드는 대변형 모드일 경우 변형될 수도 있다. Explicit, Lagrangian 계산 기법과 혼합-분할 구역 기법(mixed discretization zoning technique)을 통해 소성파괴와 유동을 아주 정확하게 모델링할 수 있다(Itasca Consulting Group, 2006).

FLAC은 원래 지반과 광산 공학자를 위해 개발되었지만 역학분야의 다양한 문제를 해결할 수 있는 다양한 구성방정식과 비선형 지질 모델이 포함되어 있다. 이 외에 마찰조건을 모델링할 수 있는 불연속면 요소, 평면변형률, 평면응력, 축대칭, 지하수와 압밀 모델, 터널 라이닝이나 록볼트와 같은 지보요소도 고려할 수 있다. 또한 열 문제, 점탄성 크립(creep), 동역학 문제 등도 옵션모델을 사용하여 모델링할 수 있다. 그리고 임의의 변수에 대해서도 다양한 방식으

로 후처리 할 수 있는 그래픽 기능도 매우 뛰어나다. 끝으로 FLAC은 자체 언어인 FISH를 가지고 있어서 사용자가 원하는 기능이나 구성모델 등을 추가할 수 있는 장점이 있다.

해석시 사용된 모델은 Mohr-Coulomb 모델로 Mohr-Coulomb 식은 압축응력 형태의 가장 일반적인 파괴형태인 전단파괴 조건식으로 FLAC 3D에서는 체적탄성계수, 전단탄성계수, 마찰각, 점착력 등을 입력변수로 적용한다. 식(1)과 Fig. 13은 Mohr-Coulomb 모델의 식과 파괴기준식이다(Goodman, 2004).

$$\sigma_{hmin} = P_s \quad (1)$$

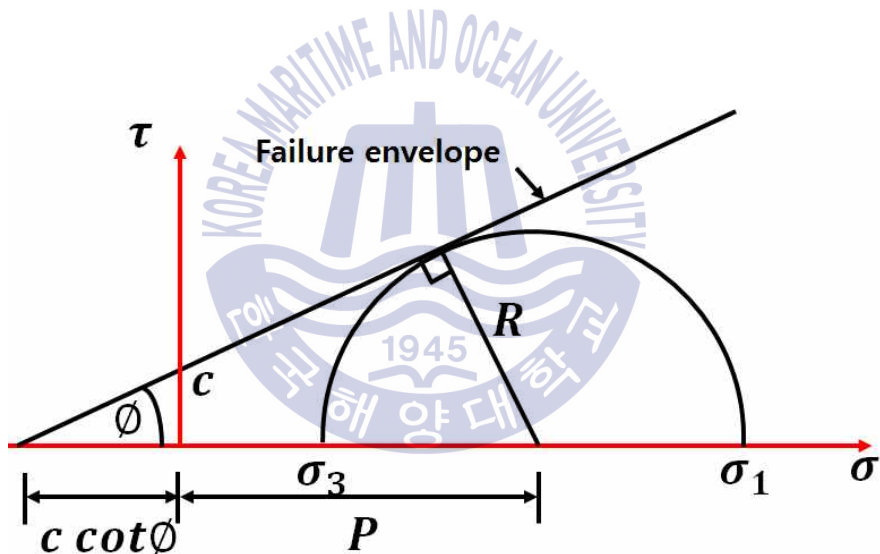


Fig. 13 The Mohr-Coulomb failure criterion

4.1.3 FLAC의 흐름도

본 논문에서 사용된 Explicit Numerical 모형의 일반적인 해석과정을 흐름도로 나타내면 Fig. 14와 같다.

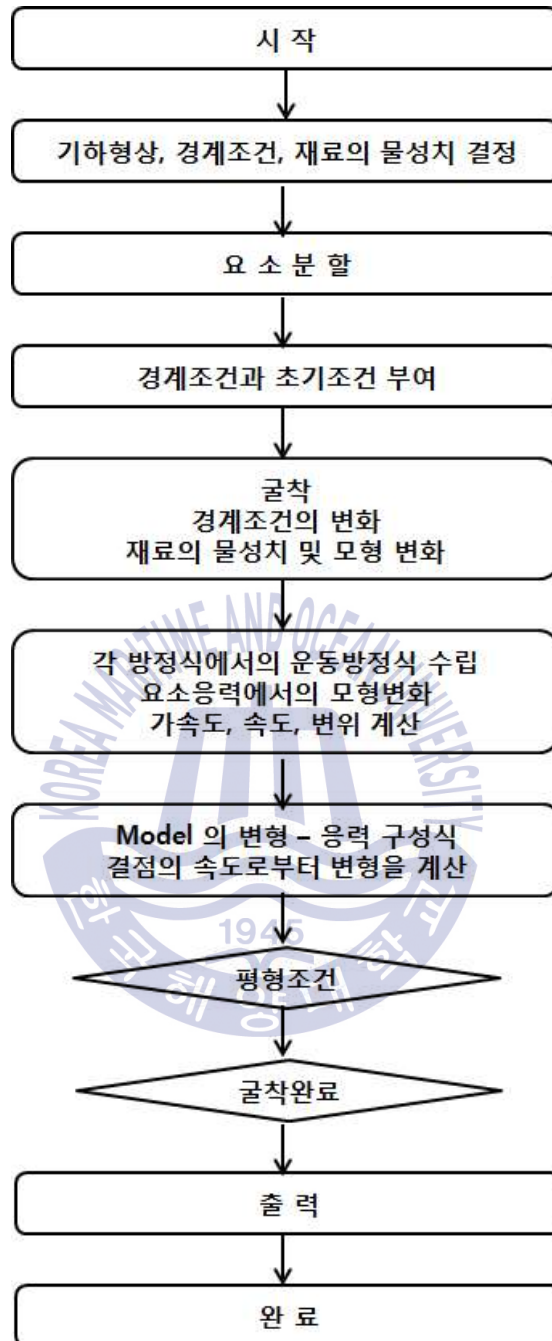
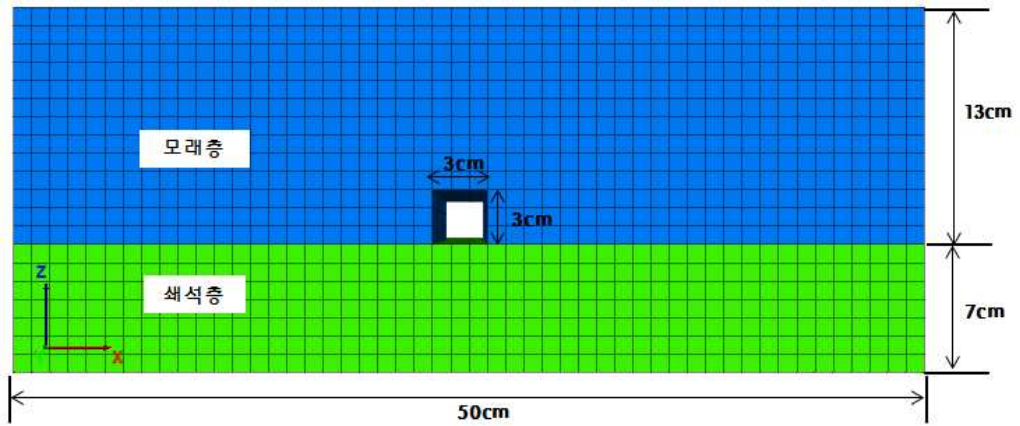


Fig. 14 Tunnel analysis diagram by FLAC

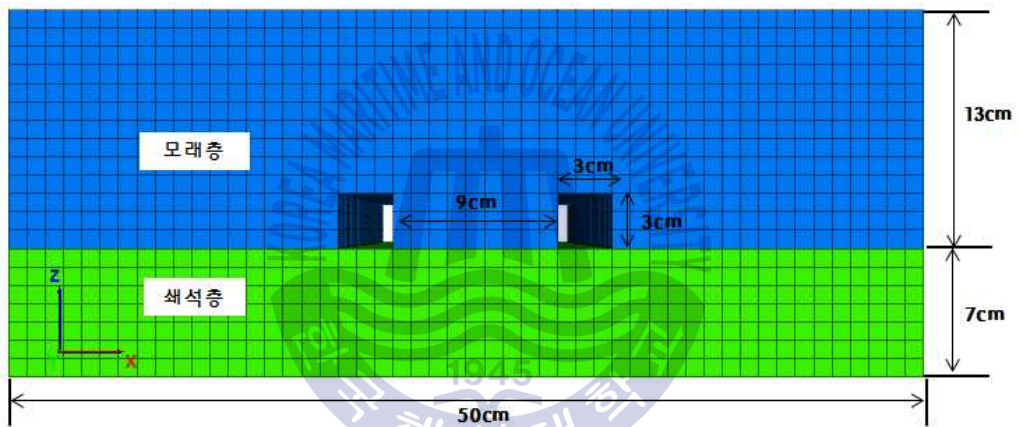
4.2 모델링 개요

유한차분법에 기초한 3차원 수치해석 프로그램 FLAC을 이용하여 지반침하 양상을 모델링하였다. 모형실험과 동일한 조건을 나타내기 위하여 지하공동의 모형과 동일하게 원형으로 모델링을 한 결과 유한차분 프로그램 특성상 model 2와 model 3에서는 mesh 가 정확히 일치하지 않아 model 1과 동일한 조건하에 모델링이 이루어지지 않는 점을 보완하여 지하공동의 모형은 model 1, 2, 3 모두 정사각형의 형태로, mesh가 불일치함으로써 생기는 오차를 줄일 수 있었다. Fig. 15는 각 모델의 단면도이다. 모형실험과 동일한 조건을 위해 model 2의 경우 지하공동 사이의 폭은 90mm로 설계를 하였으며 지하공동의 직경은 가로×세로 30mm×30mm로 모형실험과 비교하여 전체 모델에 대하여 수치해석으로 인한 지반 침하 오차는 1.2 ~ 1.3배 차이가 났다. 이는 모형실험의 원형공동과 수치해석의 사각형 공동의 부피 차이인 1.27배에 가까운 수치이기에 지반침하에 대한 결과 값은 상당히 일치하는 경향을 보였다고 사료된다. 경계조건은 좌·우측 모두 수평변위를 구속하였고 하부는 연직변위를 구속하였다. 해석영역은 Fig. 16과 같이 각각의 모델을 설계하였으며 mesh 1개의 크기는 가로×세로×높이 각각 10mm×10mm×10mm이고 지하공동 채굴은 한번 굴착 시 50mm씩 굴진을 가정하여 총 6번에 나누어 굴착을 진행하였다.

Model 1



Model 2



Model 3

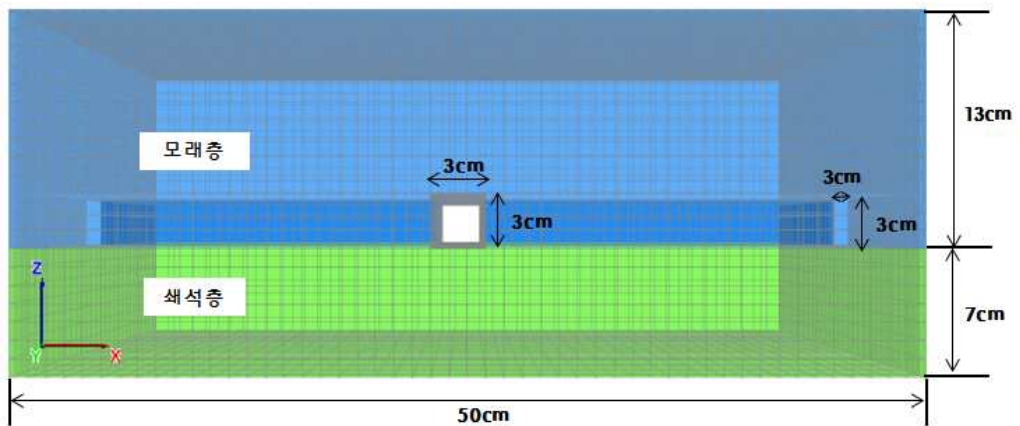
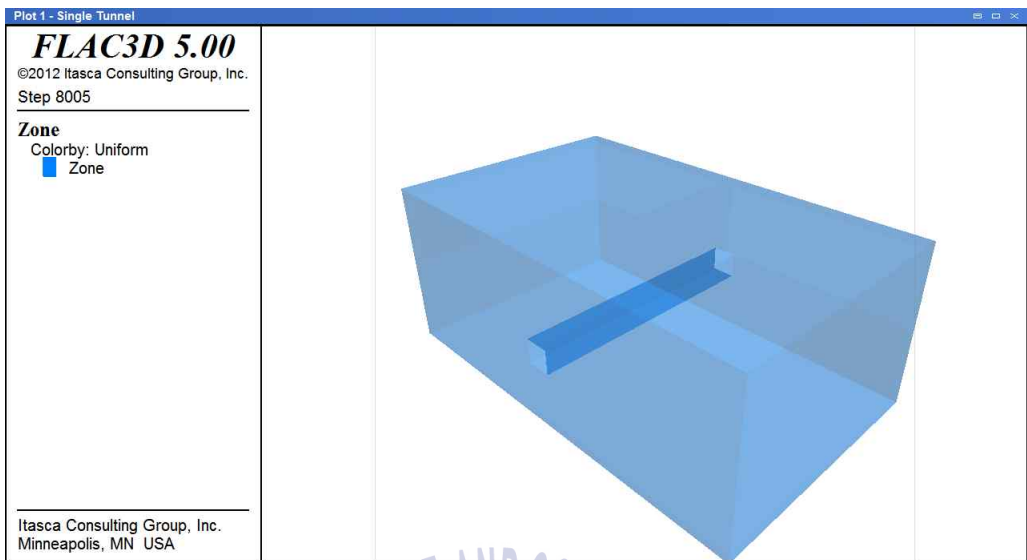
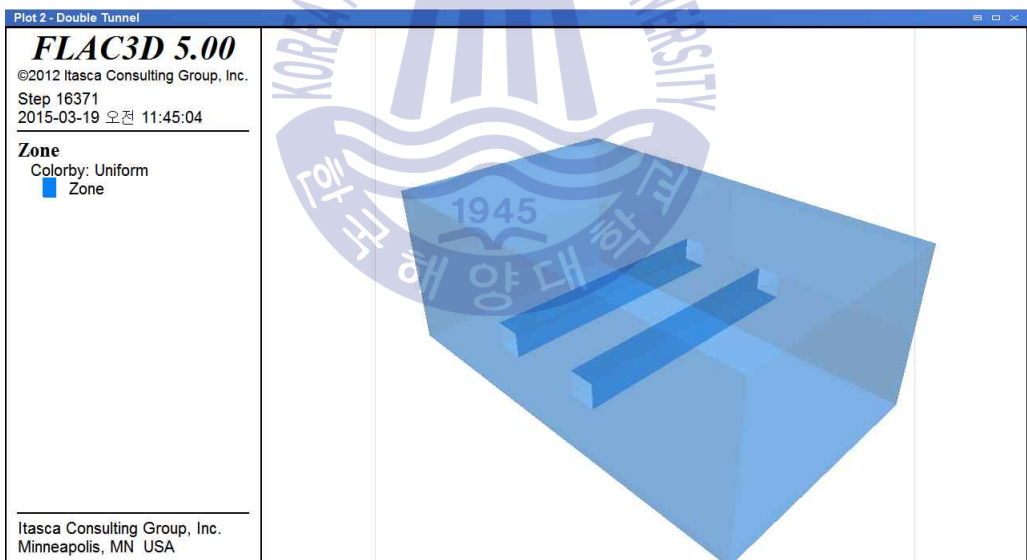


Fig. 15 Plane view of each model

Model 1



Model 2



Model 3

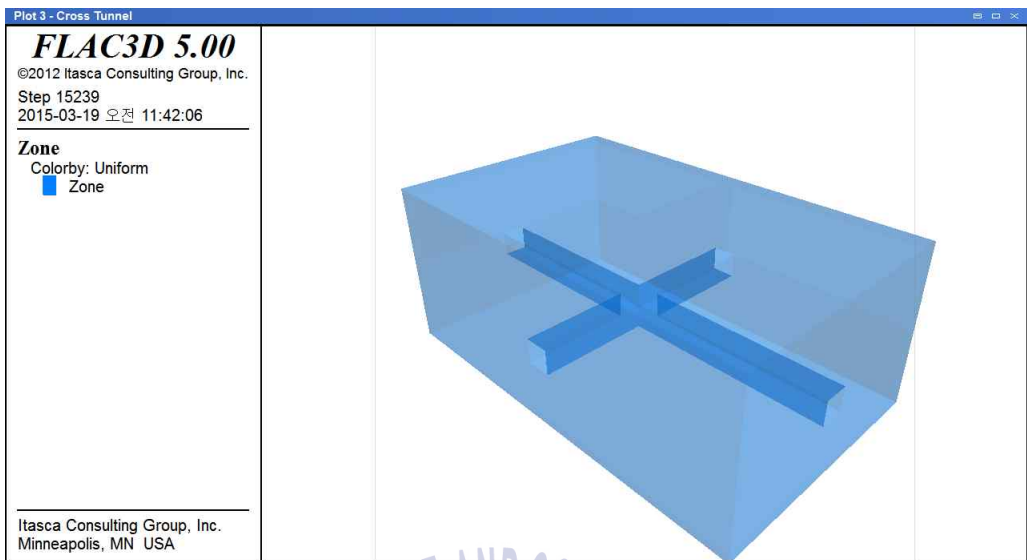
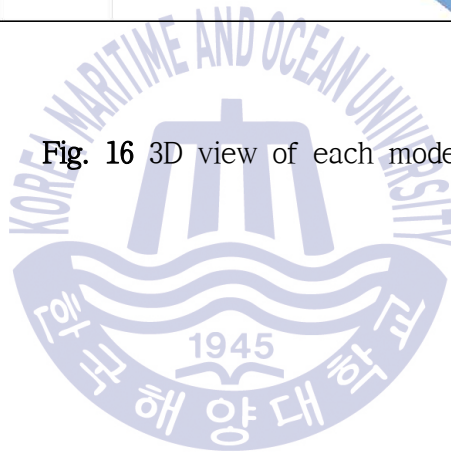


Fig. 16 3D view of each model



수치해석 모델링에 사용된 물성값 중 모래는 기존에 모래지반으로 실험한 논문(정성호, 2007)을 참고하여 물성값을 산정하였으며 쇄석은 건설교통부(1999)가 제시한 지반 물성치 중 자갈층의 물성치를 입력 물성치로 산정하였다. 또한 에폭시의 물성은 실험실에서 기초물성 측정 및 일축압축강도, 압열인장강도 등을 이용하여 구하였으며 그 결과는 table 6과 같다.

시험모델은 흙 또는 암반의 메커니즘에 이용되며 사면의 안전성과 지하굴착에 주로 이용되는 Mohr-Coulomb model을 적용하였다.

Table 6 Input parameter for numerical model from laboratory tests

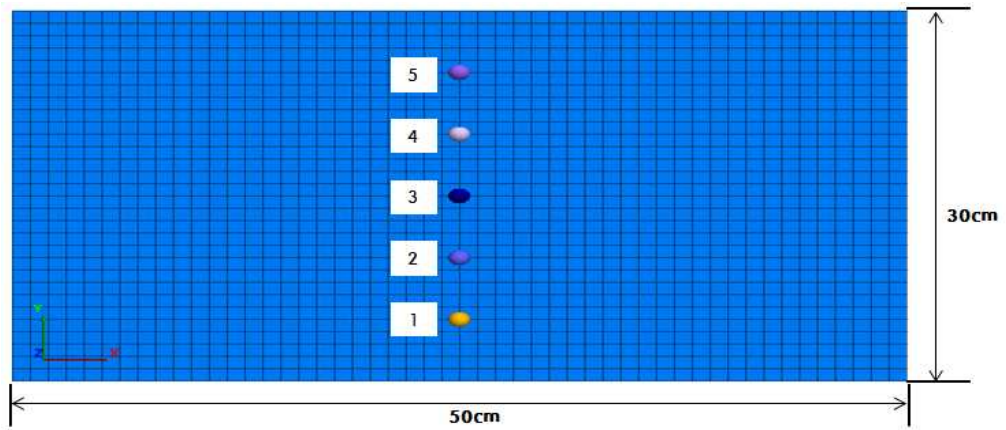
	단위중량 (tonf/m ³)	점착력 (tonf/m ²)	내부 마찰각 (°)	변형계수 (kg/m ²)	포아송비 (ν)	체적 탄성계수 (tonf/m ²)	전단 탄성계수 (tonf/m ²)
표준사	1.5	0	37.8	5,000	0.22	2,976	2,049
쇄석	2.1	10	35	29,000	0.35	32,222	10,740
에폭시	2.1	50	40	65,000	0.3	54,166	25,000

4.3 해석 결과

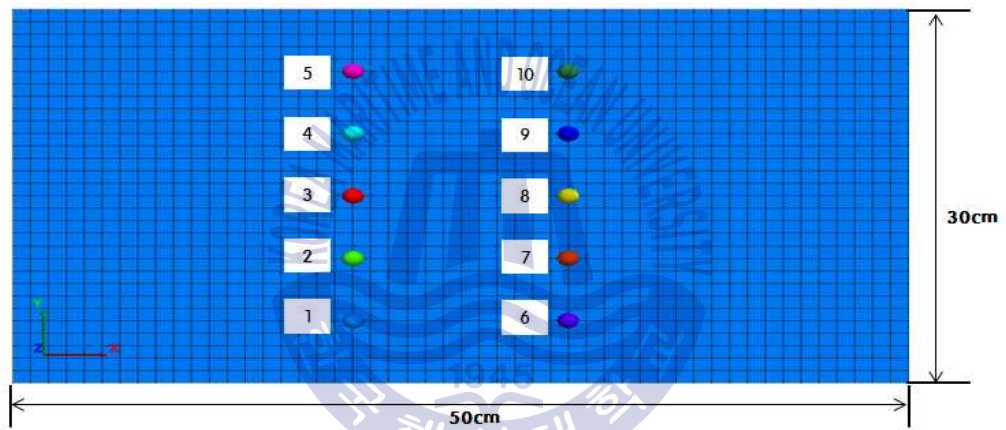
지반 침하를 기록하는 grid point는 모형실험과 동일한 위치에서 Fig. 17과 같이 50mm간격으로 측정이 이루어졌다. Grid point는 지반 보강을 위해 주입하는 주입재의 중심부분을 고려하여 각 지점에서의 지하공동 채굴에 의해 발생된 변위 분포 결과를 파악하고자 하였다. 모형 실험과 동일한 조건에서 지반보강을 하기 위하여 가로×세로×높이 각각 30mm로 하여 에폭시의 물성값을 입력 하였다. 즉, model 1에서는 총 5개의 지점, model 2에서는 총 10개의 지점, model 3에서는 13개의 지점에서 지반보강이 이루어 졌다. 각 지점에서의 발생된 변위는 Fig. 18, Fig. 19, Fig. 20과 같이 각 모델에 대하여 지반보강 전·후로 비교하여 나타내었다.



Model 1-1



Model 2-1



Model 3-1

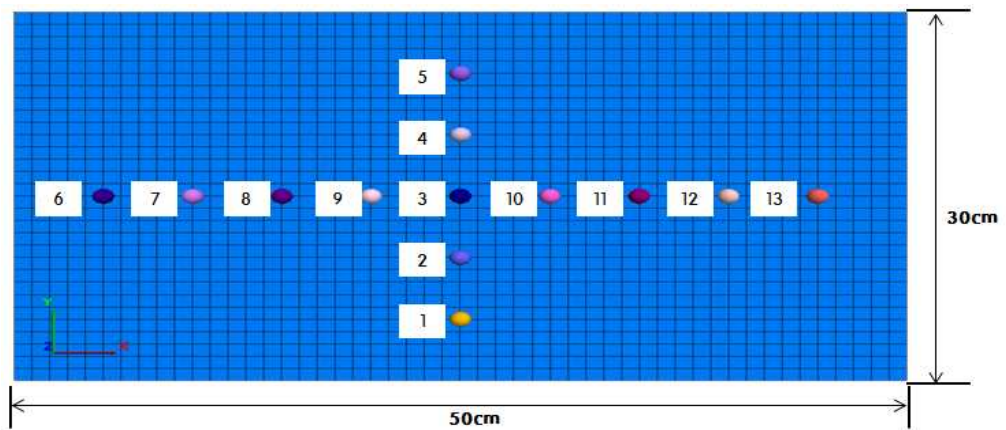
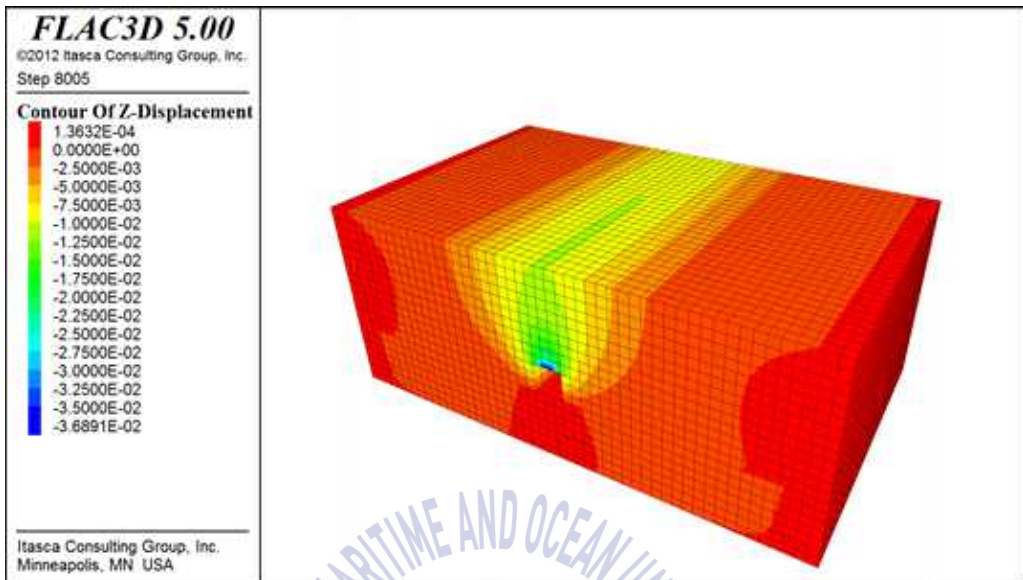


Fig. 17 Hist point (top view)

Model 1



Model 1-1

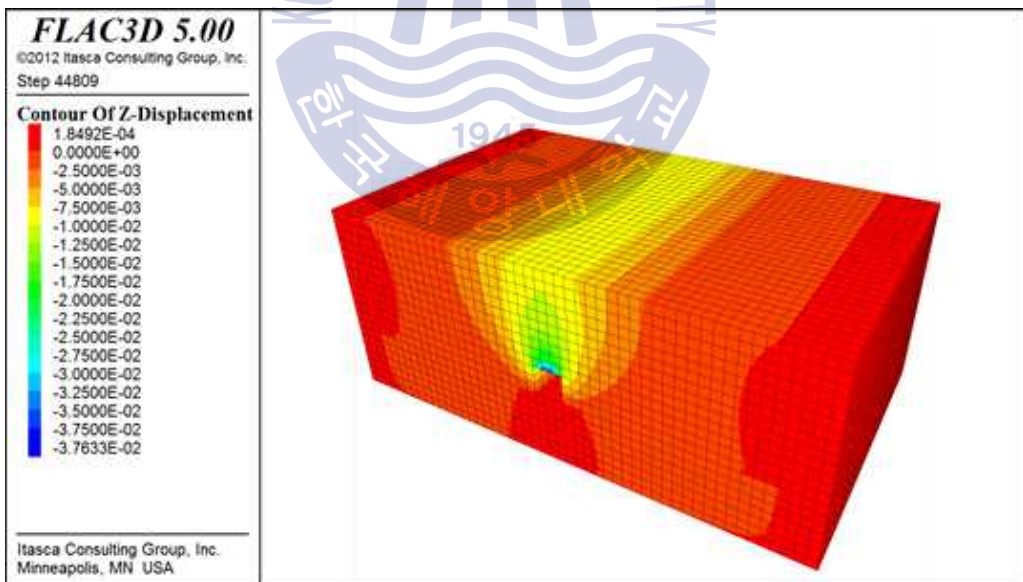
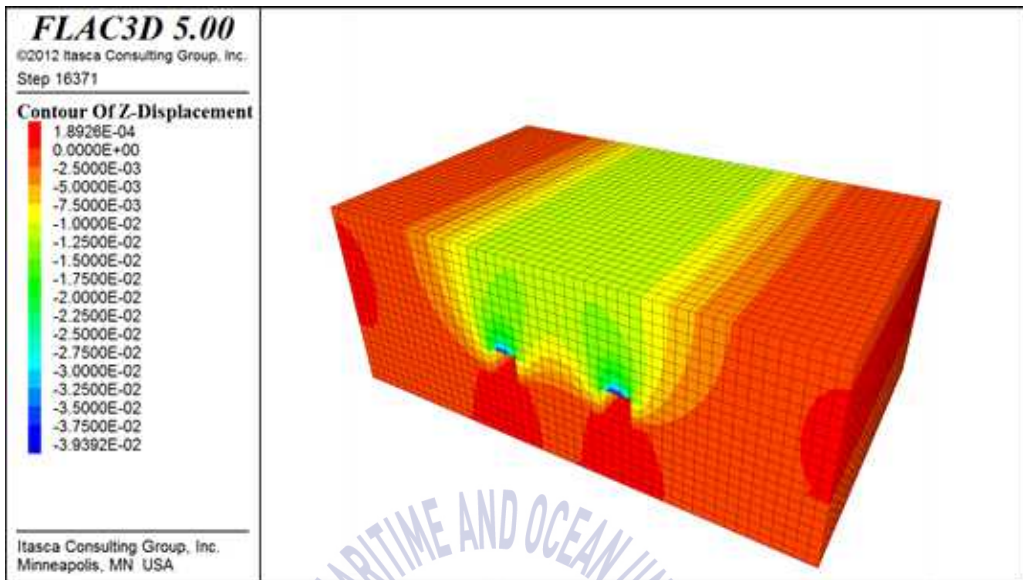


Fig. 18 Contour of Z-displacement of the model 1, 1-1

Model 2



Model 2-1

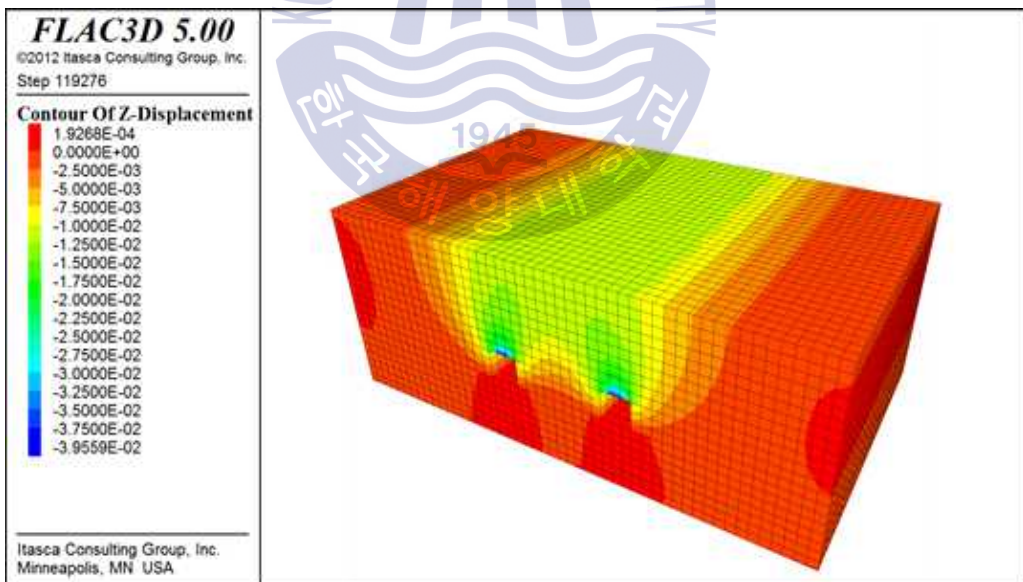
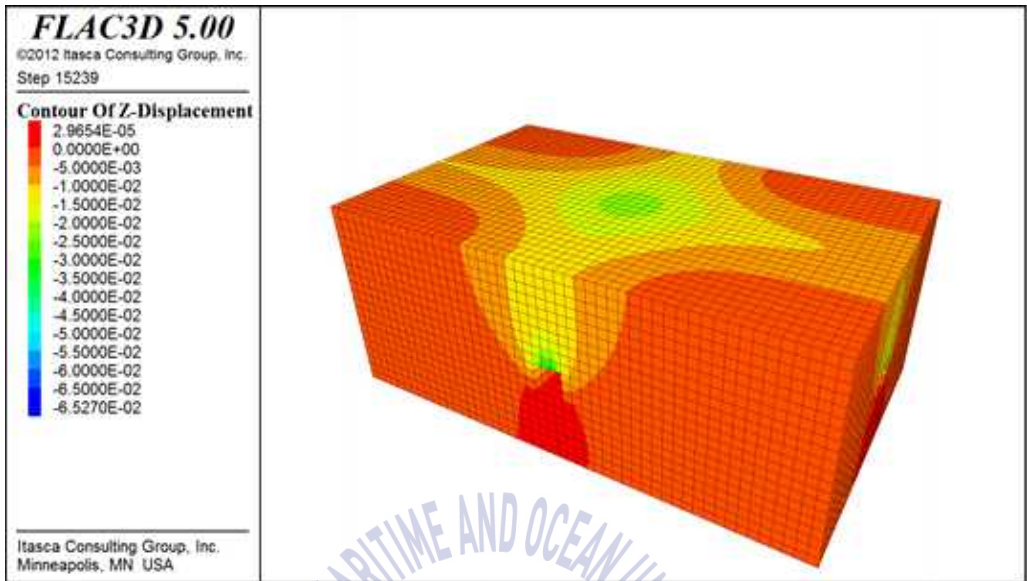


Fig. 19 Contour of Z-displacement of the model 2, 2-1

Model 3



Model 3-1

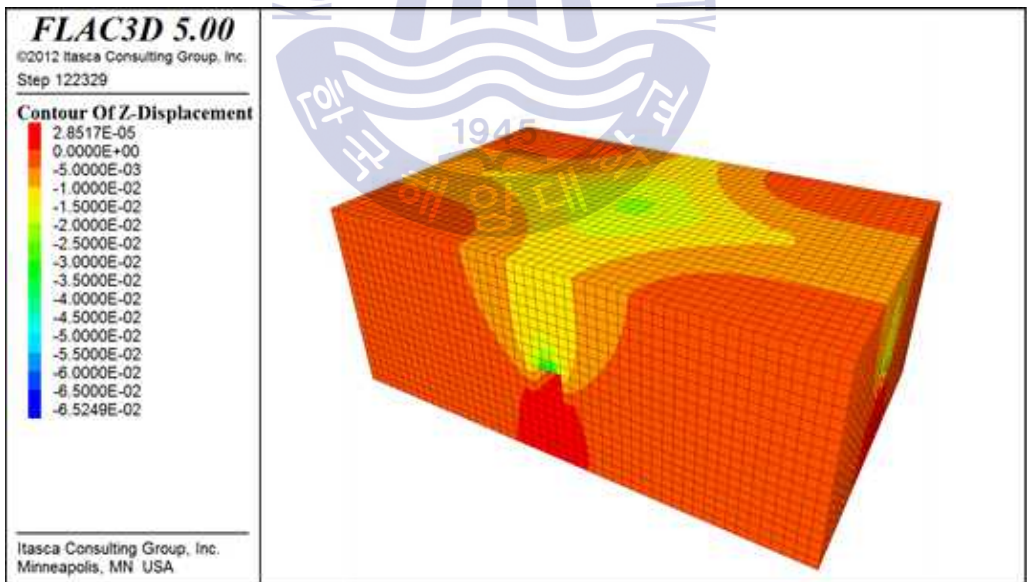


Fig. 20 Contour of Z-displacement of the model 3, 3-1

각 모델에 대해 발생한 변위를 살펴보면 table 7에서와 같이 model 1의 경우 지하공동의 축 방향으로 5개의 지점에서 평균 1.0cm의 지반침하가 발생을 하였고, 공동 상부로부터 X-축으로 거리가 멀어짐에 따라 지반침하량은 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 X-축으로 약 27cm의 범위에서 0.1cm이상의 지반 침하가 발생하는 것을 확인 하였다. 한편, 굴진은 1회 6cm씩 굴진을 하여 총 5 번에 걸쳐서 굴착을 하였다. 그 결과 수치해석 상에서는 처음 굴착이 시작되는 갱구 부근에서 미세한 차이로 변위가 더 발생하는 것을 확인하였다. Fig. 21은 보강 전·후의 지하공동 굴착으로 인한 침하량을 나타냈다.

복수공동인 model 2의 경우 table 8과 같이 공동이 두 개 존재함으로서 전체 적으로 model 1과 비교하여 평균적으로 0.2cm 더 큰 지반침하량의 결과를 보 였으며 또한 상대적으로 좌측공동이 우측공동에 비해 0.02cm정도 큰 침하를 보 였는데 이는 좌측공동이 모두 굴착된 이후에 우측공동을 굴착하는 과정에서 잔 류 침하로 인한 결과로 사료된다. X-축으로는 약 30cm의 범위에 걸쳐 0.2cm이 상의 지반침하가 발생하는 것을 확인 하였다. 보강 전·후의 지하공동의 굴착 으로 인한 침하량은 Fig. 22에 나타냈다.

90°로 교차되는 model 3의 경우 table 9과 같이 교차되는 지점(Y=15cm)에서 가장 큰 지반 침하량이 발생되었고 그 값은 2.16cm로 나타났다. Fig. 23과 같이 평균적으로 수치해석에 의한 지반 침하량은 모형실험과 비교하면 약 1.2배 정 도 큰 수치를 보였지만 이는 모형실험과 수치해석상의 터널 체적에 의한 차이 와 모형실험에서 거리측정기의 측정단위가 0.1cm까지 측정할 수 있는 한계에서 오는 오차가 발생한 것으로 사료되며, 지반보강효과는 원 지반에 비해서 평균 0.1cm의 지반침하 감소효과를 확인하였다. 결과적으로 모형실험과 수치해석에 의한 지반침하의 분포양상은 비교적 잘 일치한 결과를 보이고 있다. 이에 따라 FLAC 3D를 이용한 수치해석 모델링이 지하공동 굴착시 지반에서의 침하를 구 현할 수 있는 적합한 방법이라고 사료된다.

따라서 이러한 결과를 토대로 수치해석 상에서 지반 보강범위를 달리하여 지 반침하의 결과를 분석하고자 하였다.

Table 7 Subsidence result of numerical model 1, 1-1

Model 1, 1-1		
Point	Grouting	
	Before	After
	Subsidence(cm)	Subsidence(cm)
1	1.01	0.92
2	1.01	0.92
3	1.00	0.92
4	0.99	0.91
5	0.99	0.91

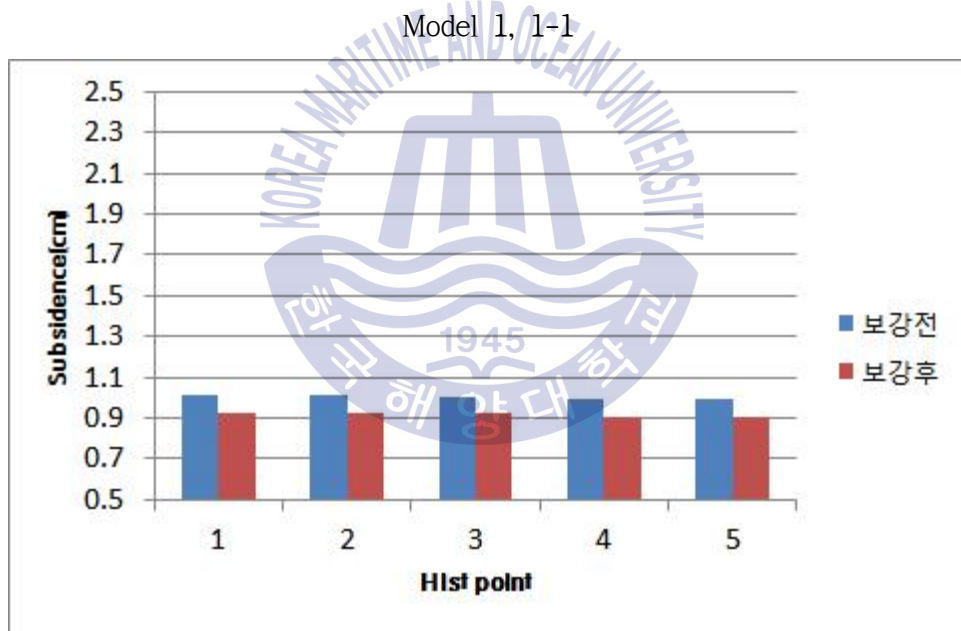


Fig. 21 Numerical modeling result of the model 1, 1-1

Table 8 Subsidence result of numerical model 2, 2-1

Model 2, 2-1		
Point	Grouting	
	Before	After
	Subsidence(cm)	Subsidence(cm)
1	1.21	1.13
2	1.21	1.13
3	1.20	1.13
4	1.20	1.12
5	1.19	1.11
6	1.19	1.12
7	1.19	1.12
8	1.18	1.12
9	1.18	1.12
10	1.18	1.11

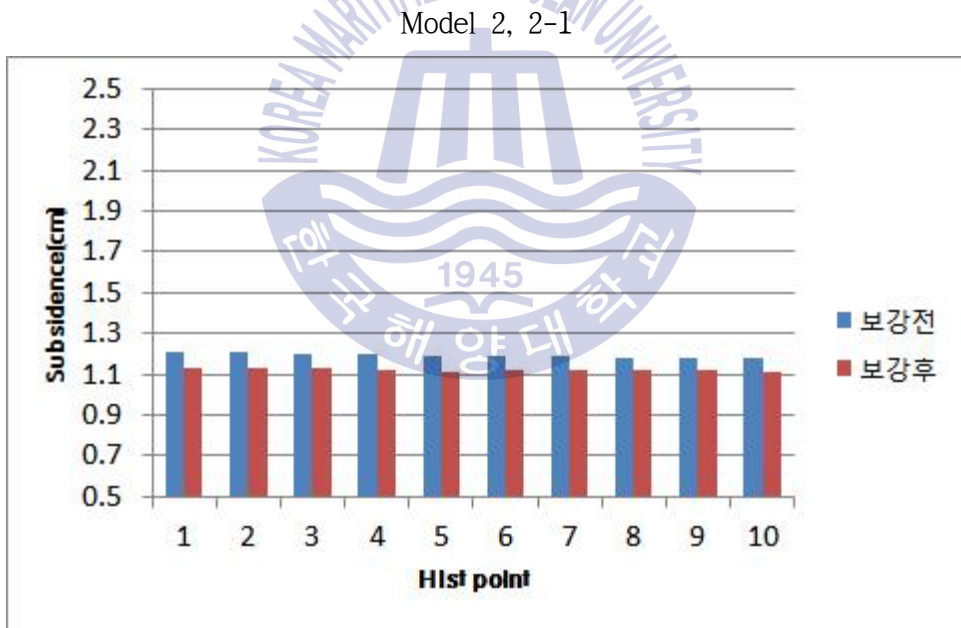


Fig. 22 Numerical modeling result of the model 2, 2-1

Table 9 Subsidence result of numerical model 3, 3-1

Model 3, 3-1		
Point	Grouting	
	Before	After
	Subsidence(cm)	Subsidence(cm)
1	1.36	1.27
2	1.86	1.67
3	2.16	1.93
4	1.86	1.67
5	1.36	1.27
6	1.04	0.93
7	1.08	1.01
8	1.32	1.24
9	1.86	1.68
10	1.86	1.68
11	1.32	1.24
12	1.08	1.01
13	1.04	0.93

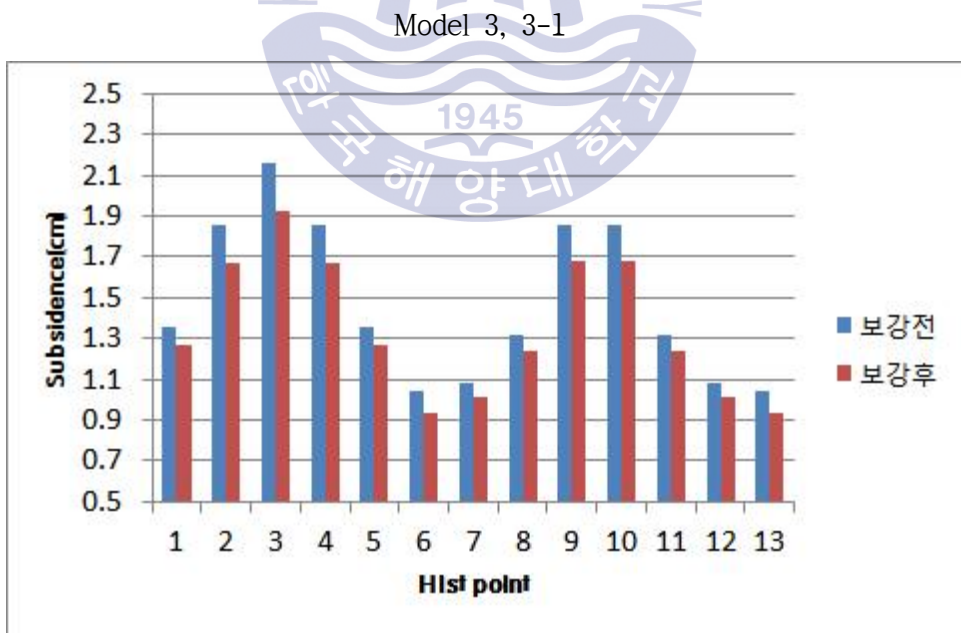
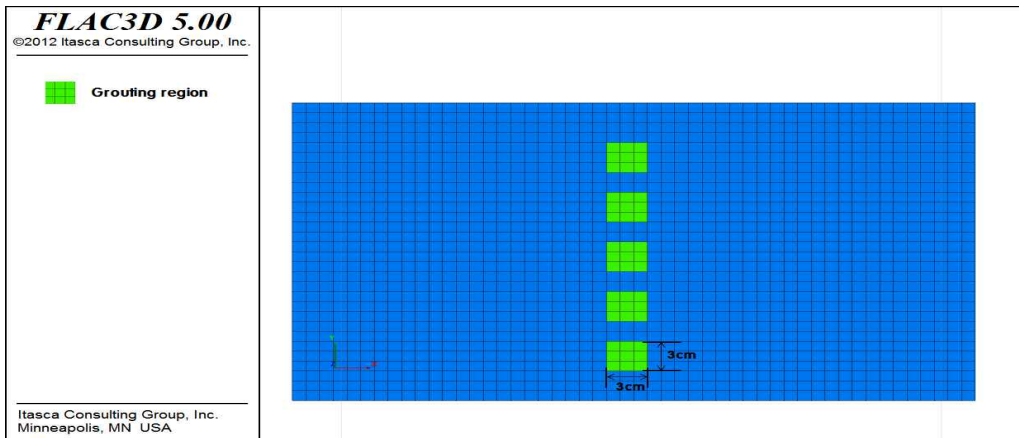


Fig. 23 Numerical modeling result of the Model 3, 3-1

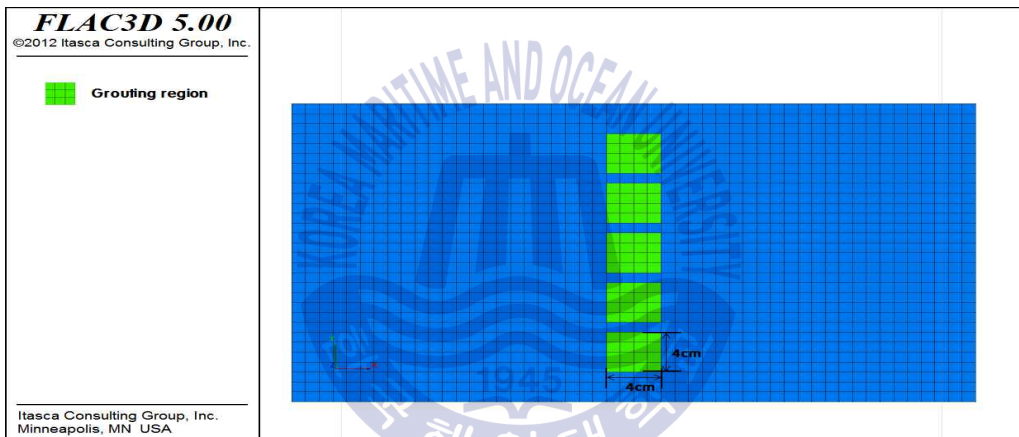
4.4 보강 범위를 달리한 수치해석 모델링

수치해석 모델링 결과를 모형실험 결과와 비교하여 보았을 때 변위의 분포 양상이 비교적 잘 일치하는 결과를 토대로 보강 범위를 달리하여 수치해석을 모델링을 수행하였다. 기존 모형실험과 수치해석에서 지반 보강범위는 가로×세로×높이를 각각 $30\text{mm} \times 30\text{mm} \times 30\text{mm}$ 이었으며, model 1에서는 5개의 구간, model 2에서는 10개의 구간, model 3에서는 13개의 구간에서 보강 범위와 깊이를 변화시켜 수치해석 모델링을 하였다. Fig. 24와 같이 model 1의 경우 보강범위를 $40\text{mm} \times 40\text{mm} \times 40\text{mm}$ (Model 1-2)의 5개의 구간과, $50\text{mm} \times 50\text{mm} \times 50\text{mm}$ (Model 1-3)의 5개의 구간을 비교하여 나타내었다. Model 2와 model 3도 model 1과 마찬가지로 각 구간에 대하여 지반보강 범위를 넓혔고 이에 대해서는 Fig. 25, Fig. 26에 나타냈다. Table 10, table 11, table 12와 같이 지반 보강에 따른 결과는 지반 보강 범위가 커질수록 침하량은 감소하는 것으로 나타났으며, model 3인 교차 공동에서 지반보강에 의한 침하 감소효과가 세 개의 모델 중 가장 크게 나타났다. 이는 model 3에서 침하량이 가장 크게 나타나는 교차 부분에서 지반보강을 통하여 지표 침하를 억제하는데 효과적인 방법이라고 사료된다. Fig. 27은 지반 보강 범위에 따른 각 모델의 침하 감소비율을 나타낸 그림이다. Model 2에서는 model 1, 3에 비해 침하 감소 비율이 낮은 결과 값을 보였다. 이는 공동과 공동 사이가 상대적으로 좁아 넓은 지역에 걸쳐 침하가 발생되었기 때문이라고 사료된다. 따라서 다른 모델과 달리 국부적인 지반 보강으로는 이러한 침하를 감소시키는데 비교적 적은 효과를 보였다고 사료된다.

Model 1-1



Model 1-2



Model 1-3

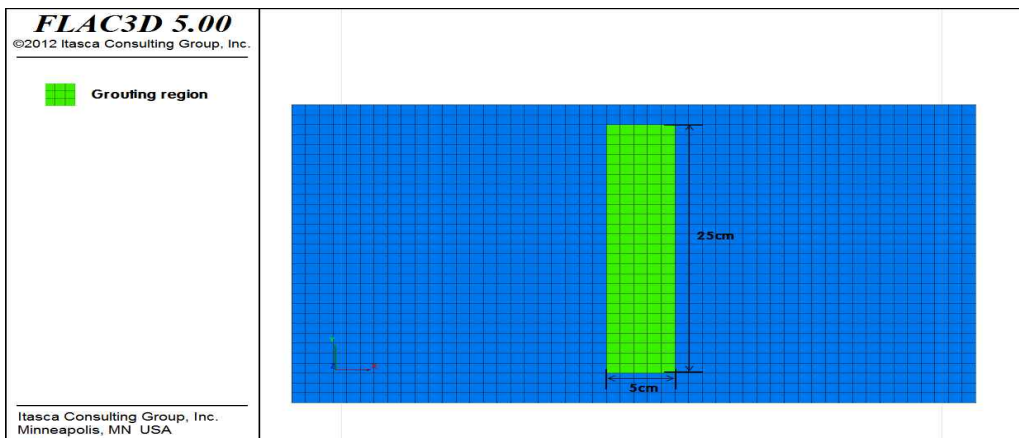
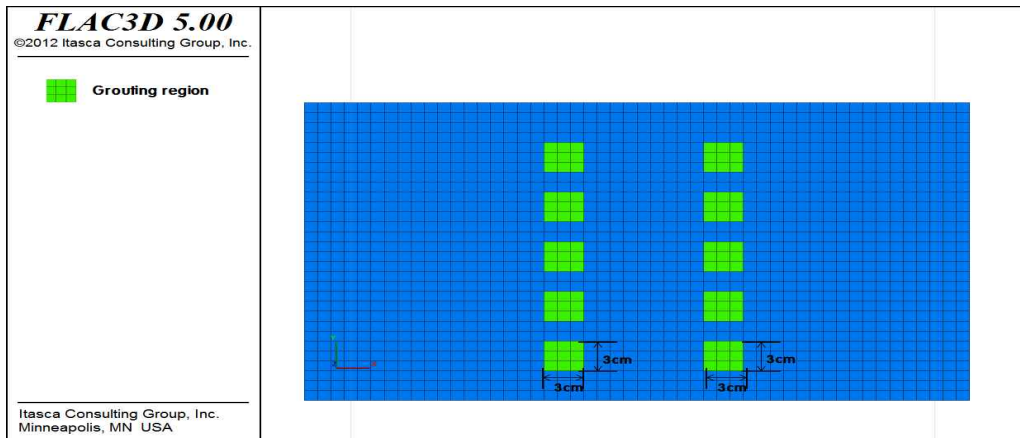
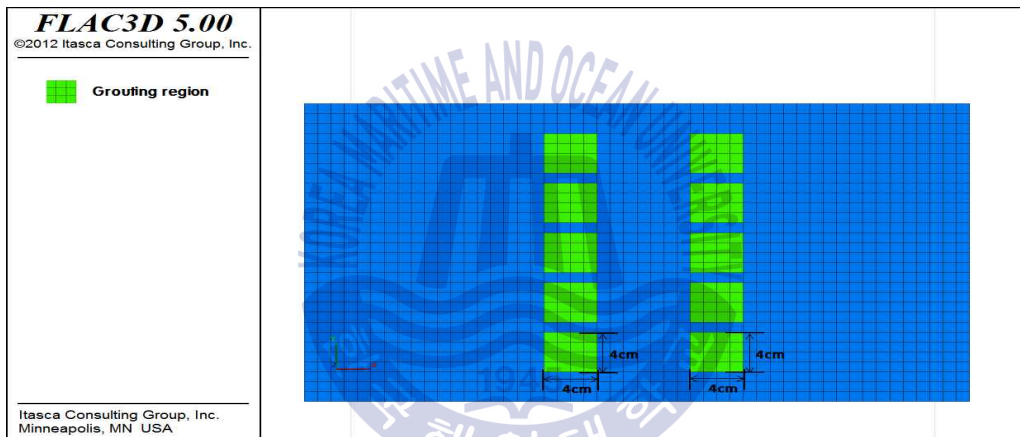


Fig. 24 Grouting region of model 1-1, 1-2, 1-3 (Top view)

Model 2-1



Model 2-2

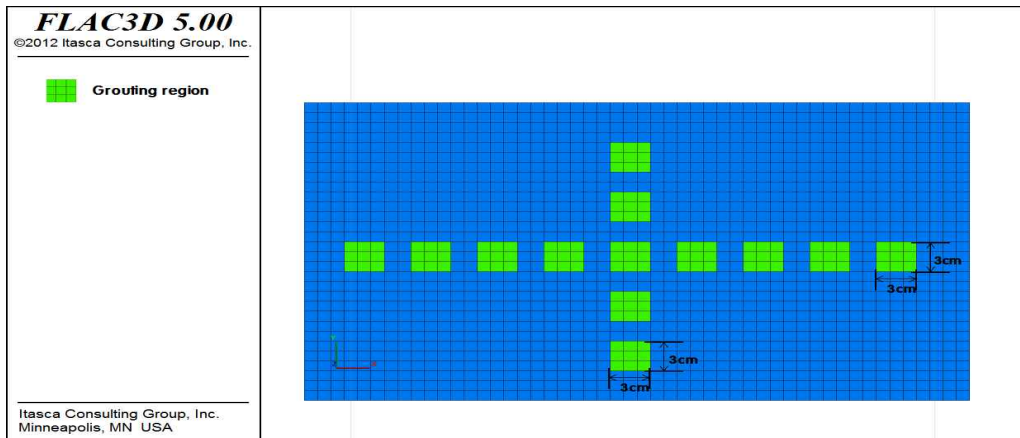


Model 2-3

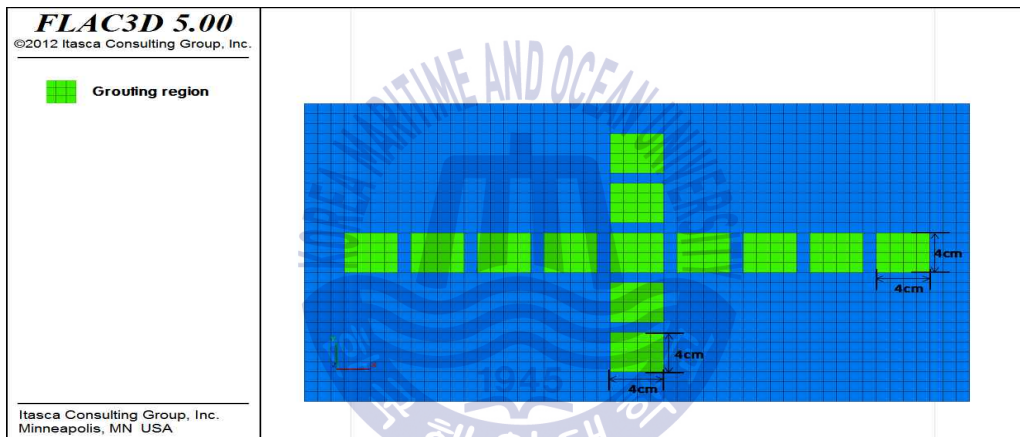


Fig. 25 Grouting region of model 2-1, 2-2, 2-3 (Top view)

Model 3-1



Model 3-2



Model 3-3

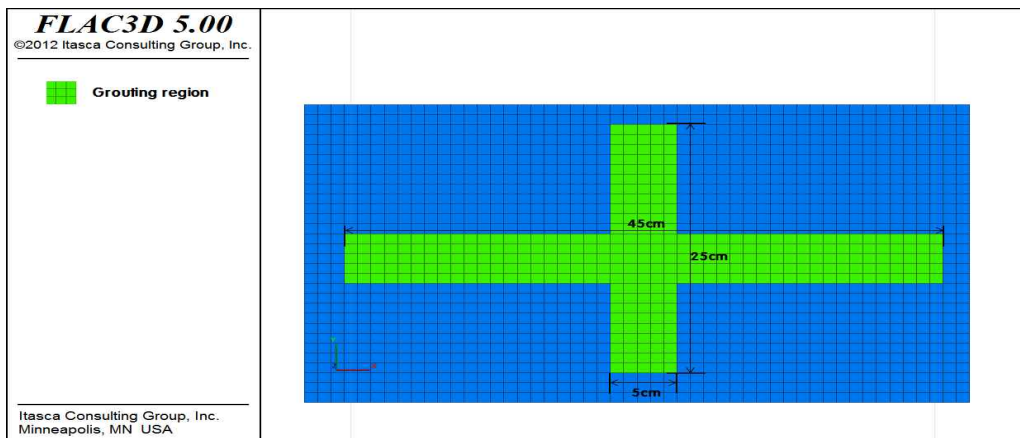


Fig. 26 Grouting region of model 3-1, 3-2, 3-3 (Top view)

Table 10 Subsidence result of numerical model 1, 1-1, 1-2, 1-3

Model 1, 1-1, 1-2, 1-3				
Point	Model 1	Grouting volume(cm^3)		
		3×3×3 (Model 1-1)	4×4×4 (Model 1-2)	5×5×5 (Model 1-3)
1	1.01	0.92	0.90	0.88
2	1.01	0.92	0.90	0.88
3	1.00	0.92	0.89	0.87
4	0.99	0.91	0.89	0.87
5	0.99	0.91	0.89	0.86
average	1.00	0.92	0.89	0.87
Subsidence reduction ratio		9.2%	11.9%	14.7%

Table 11 Subsidence result of numerical model 2, 2-1, 2-2, 2-3

Model 2, 2-1, 2-2, 2-3				
Point	Model 2	Grouting volume(cm^3)		
		3×3×3 (Model 2-1)	4×4×4 (Model 2-2)	5×5×5 (Model 2-3)
1	1.21	1.13	1.11	1.10
2	1.21	1.13	1.11	1.09
3	1.20	1.13	1.10	1.09
4	1.20	1.12	1.10	1.09
5	1.19	1.11	1.10	1.09
6	1.19	1.12	1.11	1.09
7	1.19	1.12	1.11	1.09
8	1.18	1.12	1.10	1.09
9	1.18	1.12	1.10	1.09
10	1.18	1.11	1.10	1.09
average	1.19	1.12	1.10	1.09
Subsidence reduction ratio		6.4%	8.1%	9.3%

Table 12 Subsidence result of numerical model 3, 3-1, 3-2, 3-3

Model 3, 3-1, 3-2, 3-3				
Point	Model 3	Grouting volume(cm^3)		
		3×3×3 (Model 3-1)	4×4×4 (Model 3-2)	5×5×5 (Model 3-3)
1	1.36	1.27	1.20	1.15
2	1.86	1.67	1.60	1.46
3	2.16	1.92	1.78	1.68
4	1.86	1.67	1.60	1.46
5	1.36	1.27	1.20	1.15
6	1.04	0.93	0.90	0.88
7	1.08	1.01	0.98	0.97
8	1.32	1.24	1.16	1.15
9	1.86	1.68	1.60	1.53
10	1.86	1.68	1.60	1.53
11	1.32	1.24	1.16	1.15
12	1.08	1.01	0.98	0.97
13	1.04	0.93	0.90	0.88
average	1.48	1.35	1.28	1.23
Subsidence reduction ratio		9.6%	15.2%	20.3%

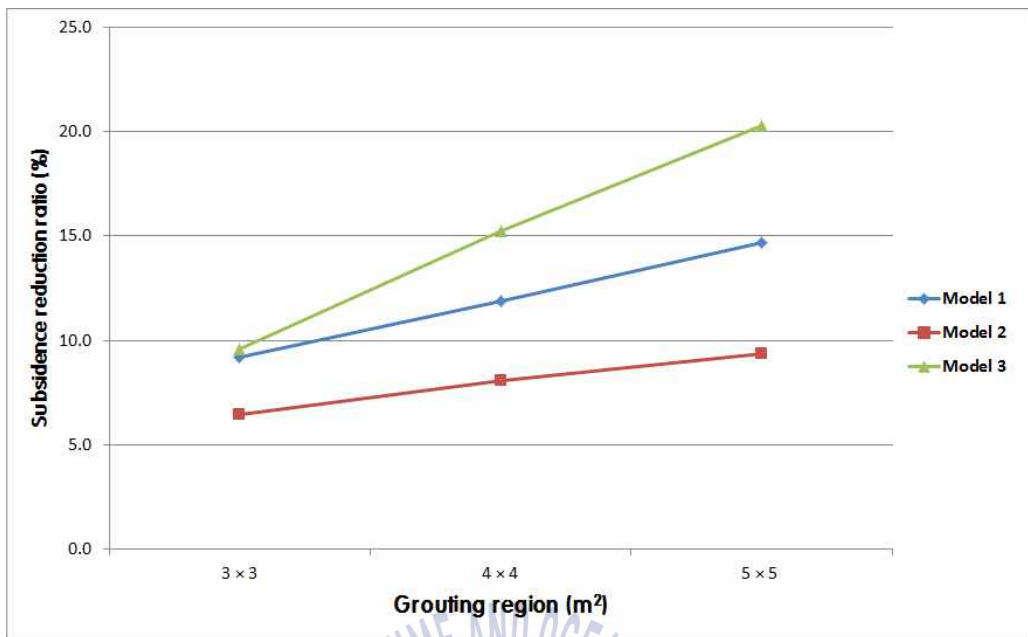


Fig. 27 Subsidence reduction ratio for numerical model



4.5 현장자료를 적용한 수치해석

본 연구에서는 지반보강에 의한 지반침하를 분석하기 위하여 실제 현장에서 시공한 터널굴착에 따른 지반침하의 양상을 확인해봄으로써 본 연구의 적용성을 확인하였다. 본 연구에서 적용한 현장 지역은 부산지하철 0호선 건설공구로 터널 굴착에 따른 지표에서의 침하양상을 수치 해석적으로 분석하였다.

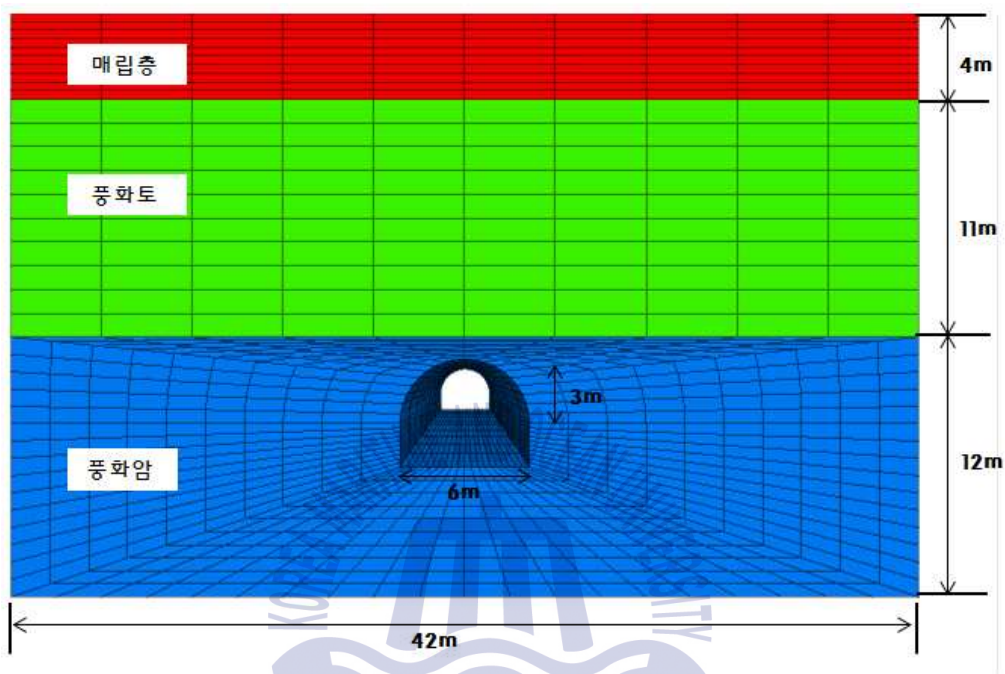
연구대상지역의 지층은 시추자료를 토대로 확인해 본 결과 연약지반으로 매립층 4m, 풍화토층 11m, 풍화암층 12m로 구성되었으며, 터널은 풍화암층 상단에서 굴착이 진행되었다. 터널은 실제 터널 모형과 동일한 말발굽형의 형태로 직경 6m, 총 연장은 100m로 설계를 하였다. 본 연구에서는 터널 굴착시 지반보강에 의한 지표에서의 침하양상을 확인하는 것이 가장 큰 목표이기에 다른 지보재의 영향 및 건물의 하중과 같은 요소는 고려하지 않았다. 수치해석에 적용된 입력 물성치는 아래의 table 13에 나타내었다. 매립토, 풍화토, 풍화암층은 부산교통공단의 종합보고서 내용을 토대로 물성값을 산정하였고, 보강재로 사용된 에폭시는 실내 실험을 통해서 얻은 물성치로 수치해석의 입력값으로 사용하였다.

Table 13 Input parameter for numerical model(real scale)

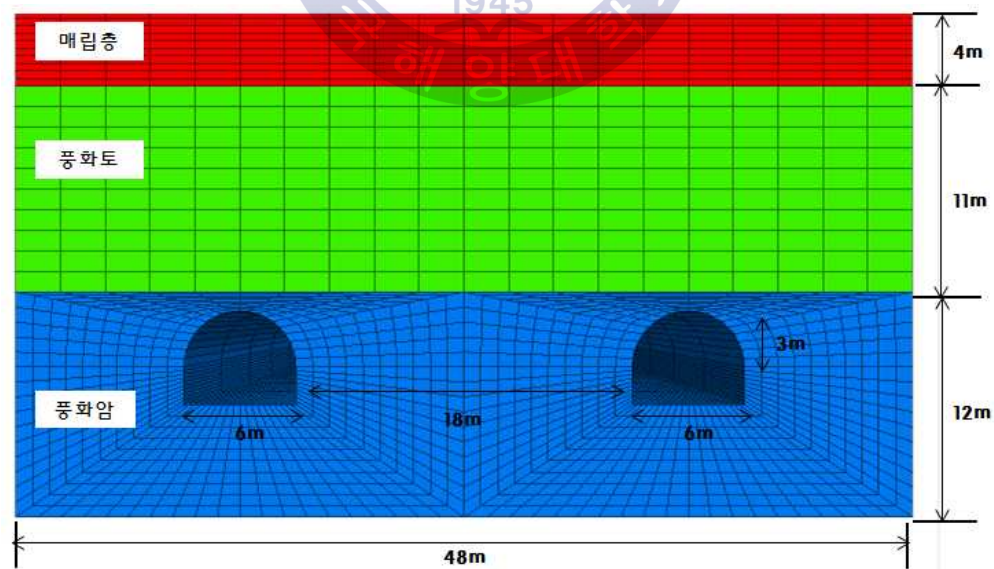
	단위중량 (tonf/m ³)	점착력 (tonf/m ²)	내부 마찰각 (°)	변형계수 (kg/m ²)	포아송비 (ν)	체적 탄성계수 (tonf/m ²)	전단 탄성계수 (tonf/m ²)
매립토	1.8	0	30	1,200	0.32	1,111	454
풍화토	1.9	2.0	30	3,400	0.33	3,333	1,278
풍화암	2.1	10.0	35	25,000	0.30	20,833	9,615
에폭시	2.1	50	40	65,000	0.3	54,166	25,000

모델은 기존의 수치해석 모델과 동일하게 단일터널, 복선터널, 교차터널의 총 3개의 모델로 구성하였다. 각 모델에 대해서는 아래 Fig. 28과 같다.

Model 4



Model 5



Model 6

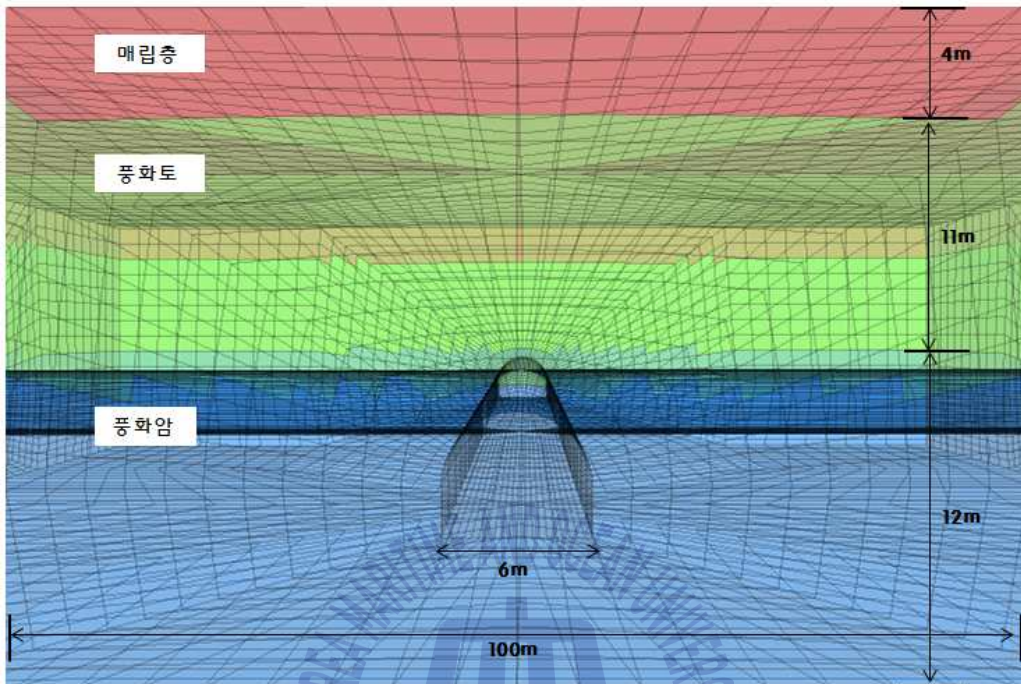


Fig. 28 Each model of real scale

Model 4, 5, 6 모두 말발굽형의 형태로 실제 굴착 된 모형의 터널과 가장 근접한 형태로 설계를 하였으며, model 5의 경우 실내 실험과 동일한 조건을 적용하기 위해 필라폭을 터널직경의 3배로 하여 18m로 설계를 하였다. 또한 터널 굴착에 의한 응력의 영향이 외부영역에 미치지 않는 영향 범위를 고려하여 각 모델 모두 해석영역을 달리 설계를 하였다. 한편, 지반보강은 풍화토 전 구간을 에폭시로 보강된 물성값으로 입력하였다. 침하를 기록하는 hist point는 20m 간격으로 하나의 터널에 총 5개 지점에서 측정하였다. 이에 따른 결과를 살펴보면 조사 대상지역이 연약지반으로 구성되어 있었기 때문에 단일터널을 제외한 두 개의 터널은 지반보강을 하지 않았을 경우 변위자체가 상당히 크게 발생을 하였다. 즉, 복선티널과 교차터널의 경우 연약지반에서 추가적인 보강 없이 굴착을 하는 경우 지반 전체에 큰 위험을 줄 수 있다고 사료된다. 하지만, 풍화토 전 구간을 지반보강 후에 측정한 지표 침하는 일정한 값에 수렴이 되었고, 이는 지반보강만으로 연약지반에서 터널설계가 가능하다는 결과를 확인하였다.

각 model 에 대한 변위는 다음과 같다.

Table 14 Subsidence result of real scale numerical model 4

Model 4		
Hist point (Y-axis)	Grouting	
	Before	After
	Subsidence(cm)	Subsidence(cm)
10m	20.1	7.37
30m	18.6	7.11
50m	16.4	6.76
70m	14.4	6.45
90m	12.9	6.14

발생된 변위를 살펴보면 table 14에서와 같이 model 4의 경우 기존의 수치해석 결과와 동일하게 처음 굴착이 시작되는 갱구 부근에서 변위가 더 발생하는 것을 확인하였다. 지반보강 전과 비교하면 최소 36%에서 최대 47%로 지반침하가 감소되는 효과를 확인하였다. 또한 지반보강 전에는 X-축으로 약 20m에 걸쳐 10cm이상의 지반침하가 발생하였고, 지반보강 후에는 약 5cm정도로 지반침하가 감소하는 것을 확인하였다.

Table 15 Subsidence result of real scale numerical model 5

Model 5		
Hist point (Y-axis)	Grouting	
	Before	After
	Subsidence(cm)	Subsidence(cm)
10m	85.6	20.7
30m	79.2	19.6
50m	74.5	19.0
70m	70.9	18.2
90m	66.7	17.5

Model 5의 경우 보강전에는 상당한 변위를 보이는 결과로써 지반 보강 없이는 터널을 설계할 수 없는 결과를 확인하였지만 풍화토 구간을 보강 후 수치해석결과를 살펴보면 table 15와 같이 각 point에서의 일정한 값으로 수렴된 결과를 확인하였다. 또한 X-축으로 약 48m구간에 걸쳐 평균 60cm이상의 지반침하가 발생하였고, 지반보강 후에는 평균 20cm 이내로 침하가 감소하였다. Model 4와 비교하면 보강 후에 측정된 지반침하량이 비교적 큰 값으로 나타난 것을 확인하였다. 따라서 복선티널의 설계를 계획한다면 지반보강 이외에도 록볼트나 숏크리트 등의 지보재 및 터널 보강을 이용한 보강법이 추가적으로 이루어져야 할 것으로 사료된다.

Table 16 Subsidence result of real scale numerical model 6 (Y-axis)

Model 6		
Hist point (Y-axis)	Grouting	
	Before	After
	Subsidence(cm)	Subsidence(cm)
10m	150	10.0
30m	146	13.5
50m	239	25.7
70m	146	13.5
90m	150	10.0

Table 16은 cross tunnel에서 지반 보강 전·후 측정된 지반 침하량을 나타내었다. Model 6는 model 5와 마찬가지로 보강 전에는 상당한 변위로 측정된 것을 확인 하였다. 두 개의 터널이 교차되는 지점에서 지반보강 전 반경 13m 구간에서는 1m이상의 지반 침하가 발생하였고, 지반 보강 후 약 16cm로 지반침하가 크게 감소한 것을 확인하였다. 따라서 교차되는 부분에서는 터널 보강 및 추가적인 보강이 필요한 것으로 사료된다. Fig. 29는 실제 현장 스케일에서의 각 모델에 대하여 지반 보강 후 측정된 지반침하량을 나타낸다. Model 6-1에서 지반보강에 따른 지반침하의 감소가 가장 크게 나타났으며, model 5-1의 경우 지반보강 후에 3개의 모델 중 평균 변위가 크게 나타났다. 최종적으로 3개의 모델 모두 지반 보강 후에는 구조물의 최대 한계 허용 침하량 기준치인 30cm

이내로 측정된 것을 확인할 수 있었으며, 이는 연약지반의 지반보강으로 지반 침하량을 크게 감소시킬 수 있는 방법이라 사료된다.

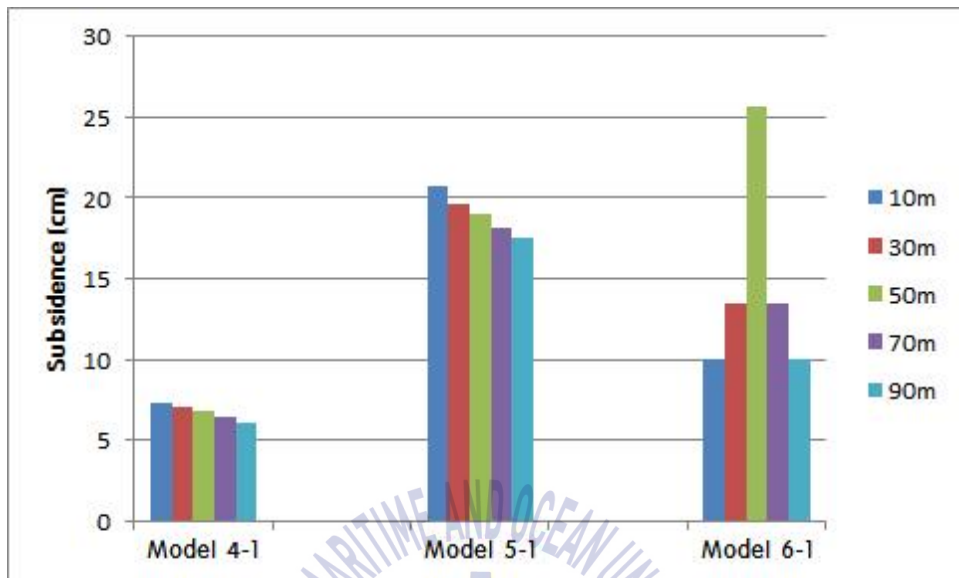
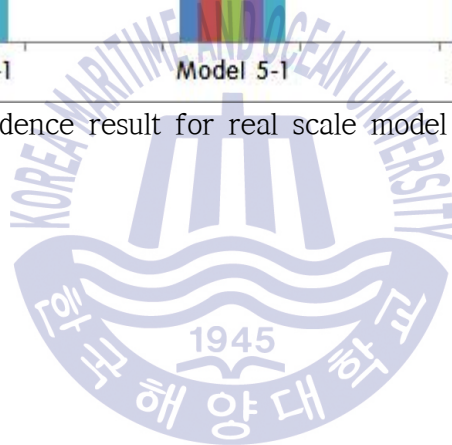


Fig. 29 Subsidence result for real scale model (after grouting)



제 5 장 결 론

본 연구에서는 실내 모형 실험을 실시하여 연약지반에서 지하공동 굴착시 지반보강에 따른 지반침하량을 비교 분석하였으며 3차원 유한차분법에 근거한 FLAC 3D를 사용하여 지하공간 굴착에 따른 지반 침하를 수치적으로 모사했다. 모형 실험에서의 결과 값과 수치해석의 결과값이 비교적 일치하는 결과를 토대로 수치해석상에서 보강범위를 달리하여 지반 침하량을 비교·분석하여 다음과 같은 결론을 도출 할 수 있었다.

1. 모형 실험결과 model 1, model 2, model 3 순으로 지반 침하량은 증가하는 것으로 나타났으며, 교차 공동인 model 3의 경우 최대 침하량은 교차지점에서 1.8cm로 세 개의 모델 중 가장 크게 발생하였다. 지반보강 후에 측정된 지반 침하량은 각 모델 모두 0.1cm의 감소효과를 확인하였다. 이는 실험실 스케일에 맞춰 지반 보강을 좁은 구역에서 실시한 결과이며, 실제 현장에서 연약지반의 지반보강이 이루어 질 때 지반침하 감소효과를 크게 볼 수 있을 것이라 사료된다.
2. 모형 실험과 동일한 조건에서 수행된 수치해석 결과, 발생하는 지반침하량을 살펴보면 평균적으로 모형실험과 비교하여 약 1.2배 정도 큰 수치를 보였지만 이는 모형실험과 수치해석상의 공동 체적에 의한 차이로 발생된 것이라 사료된다. 또한 지반보강효과는 원 지반에 비해서 평균 0.1cm의 지반침하 감소효과를 확인하였다. 결과적으로 모형실험과 수치해석에 의한 지반침하의 분포양상은 비교적 잘 일치한 결과를 보이고 있다고 사료된다.
3. 지반 보강 범위를 달리 하여 수치해석으로 각 모델을 설계한 결과, 모형

실험에서 보강 범위가 $30\text{mm} \times 30\text{mm} \times 30\text{mm}$ 인 것을 기준으로 하여 보강범위가 $40\text{mm} \times 40\text{mm} \times 40\text{mm}$, $50\text{mm} \times 50\text{mm} \times 50\text{mm}$ 의 체적을 가질 때 각 모델에 대하여 지반 침하량을 산정하였다. 보강 범위가 커질수록 지반침하량은 감소한 것으로 나타났으며, model 3인 교차 공동에서 지반보강에 의한 침하 감소효과가 세 개의 모델 중 가장 크게 나타났다. 이는 model 3의 교차 부분에서 지반보강을 통하여 지표 침하를 억제하는데 효과적인 방법이라고 사료된다.

4. 모형실험 결과와 수치해석 결과를 바탕으로 실제 현장 자료를 적용하여 본 연구의 적용가능성을 검토하였다. 그 결과 보강 없이 연약지반에서 model 4를 제외한 model 5와 model 6의 설계는 불가능한 것으로 확인되었으며, 지반을 보강한 이후 측정된 지반 침하는 3개의 모델 모두에서 구조물의 최대 한계 허용 침하량 기준치인 30cm 이내로 측정되었다.
5. 3차원 수치해석 프로그램인 FLAC3D를 이용하여 터널 굴착에 따른 지반 침하 모델을 구현할 수 있었으며, 이를 토대로 실제 연약지반에서의 지하굴착에 앞서 지반보강에 의한 침하량을 추정하는 것이 가능하다고 사료된다.
6. 국부적인 보강방법 뿐만 아니라 광역적인 지반보강을 통한 지반침하량 산정을 위해서는 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료 되며, 본 연구 결과는 기존 지하공동으로 인한 침하 발생 예상지역의 상부 지층 보강법을 이용한 지반침하 방지공법의 자료로 이용될 수 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

건설교통부, 1999. “터널 표준시방서”

김명호, 2003. *근접굴착에 의한 기존 지하철 구조물의 거동연구*. 공학석사 학위논문, 고려대학교

박의섭, 류동우, 선우춘, 선희순, 정소걸, 정용복, 천대성, 2006. *지반침하재해 저감기술 개발에 관한 연구*. 한국지질자원연구원

부산교통공단, 2003. “토목시설시설계용역 종합보고서”

송영수, 2010. *실내 모형시험을 통한 시멘트 그라우트의 지반침투성능 분석*. 공학방사 학위논문, 충남대학교

유영현, 김창용, 이대영, 신희성, 배규진, 최수일, 이찬우, 김양균, 1997. *국내 터널건설의 현황조사 및 교차터널의 설계법 개발연구 최종보고서*, 한국건설기술연구원, pp. 20-25.

오하진, 2001. *대단면 교차터널 시공과 계측*, 한국터널공학회 학술발표회논문집, 한국터널공학회, pp. 243-259.

임찬수, 2006. *도로터널 붕락원인 및 보강공법에 관한 사례 연구*. 공학석사 학위논문, 충남대학교

정성호, 2007. *발포성 에폭시 수지 주입에 의한 터널의 안정성 증대효과 분석*. 공학석사 학위논문, 경희대학교

천병식, 1997. *건설기술자를 위한 지반주입공법*, 원기술, pp 62-133

천병식, 백기현, 주태성, 도종남, 2005. *시멘트 몰탈형 고압분사공법(MJM)에 의한 연약지반 보강효과에 관한 연구*. 한국지반환경공학회지, 6(4), pp. 59-64

최성웅, 김재동, 최광수, 2009. *폐광산 지역에서의 지반침하예측을 위한 퍼지추론기법 적용 연구*. 한국암반공학회지, 19(5), pp. 463-472

한국암반공학회, 2005. *암반공학 수치해석*, 건설정보사, pp. 165-176

Attewell and Woodman, 2003. *Predicting the Dynamics of ground settlement and its derivatives caused by tunneling in soil*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts Vol. 20 No. 5 pp. 148 ~ 148

Bieniawski, Z.T. 1984, *Rock Mechanics Design in Mining and Tunneling*, A.A.Balkema

Bruhn, R.W, and R.C. Speck, 1986. *Characteristics of Subsidence Over Pillar Extraction Panels*, U.S. Bureau of Mines, Contract Report J0233920, GAI Consultants, Inc., July 1986.

Cundall, P.A. 2001. *A discontinuous future for numerical modeling in geomechanics*, Proceedings of the Institute of Civil Engineers, Geotechnical Engineering January Issue 1, pp. 41-47

Debasis, 2003, *Analysis of Coal Mine Roof Fall Rate Fuzzy Reasoning Techniques*, Int. J.Rock Mech. and Min. Sci., Vol.40, pp. 251-257

Goodman Richard E., 2004. *Introduction to Rock Mechanics for underground mining*, 3rd Ed, Springer press, pp. 370-379

Itasca Consulting Group, INC., 2006. *FLAC 3D User's manual*, USA, ITASCA

Kleyner, I., Krizke, R. J. and Pepper, S. F., 1994. *Influence of Grout Pressure on Capacity of Bore-Injected Piles and Anchors*, Proc. of the International Conference on Grouting in Rock and Concrete, Salzburg, Austria, pp. 159~165

Schmidt, B. 1969. *Settlements and Ground Movements Associated with Tunneling in Soils*, Ph.D. Thesis, University of Illinois, Urbana.

Srivastava, R.K. and Rac, K.S., 1990. *Shear behavior of cement grout filled artificially created planar joints*, Proceedings of the International Symposium on Rock Joints, Leon, Norway, pp. 309-316



감사의 글

어느덧 2년 넘게 생활한 대학원의 생활을 마무리 하는 시간이 다가왔습니다. 지금도 이렇게 감사의 글을 쓰려고 하니 학교에 대한 그리움과 암석역학실험실에서의 생활이 많이 생각이 납니다. 이 논문이 완성되기까지 저를 도와주시고 옆에서 응원해 주신 분들에게 적은 지면을 빌려 감사의 마음을 전하고자 합니다,

먼저 학부생 때부터 암석역학실험실에서 많은 공부를 할 수 있게 지도해주시고 이 논문을 마무리 하는데 많은 도움을 주신 장원일 교수님께 진심으로 감사의 인사를 드립니다. 항상 옆에서 격려해주시고 믿어주셔서 지금의 저로 성장할 수가 있었습니다. 부족한 점이 많은 저에게 큰 관심과 사랑을 주셔서 진심으로 감사를 드리며, 교수님께서 주신 깊은 믿음 항상 가슴속에 새기며 어느 위치 어느 자리에 가서도 최선을 다하고 교수님의 은혜를 잊지 않겠습니다. 그리고 미흡한 저의 논문을 끝까지 검토해 주시고 많은 조언을 해주신 유경근 교수님과 정우근 교수님께도 진심으로 감사의 말씀을 드리고 싶습니다. 또한 대학원 과정 동안 저에게 많은 가르침을 주신 신성렬 교수님, 임중세 교수님, 윤지호 교수님께도 다시 한 번 가르침에 감사의 말씀을 드립니다.

처음 저의 실험실생활을 하게 도와준 정진 형 정말 감사드립니다. 또한 의창이형, 영목이형 덕분에 실험실생활을 무리 없이 헤쳐 나갈 수 있었고, FLAC 이라는 소프트웨어를 배우게 되면서 저의 논문에서 큰 도움이 되었습니다.

그리고 학부생 때부터 대학원까지 함께한 동기 홍주에게도 고맙다는 말을 하고 싶고 지금 암석역학실험실에 있는 상훈이랑 실험실 막내 윤주에게도 많이 못 챙겨 줘서 미안하고 고맙다는 말을 하고 싶습니다. 또한 다른 실험실이지만 항상 웃으시면서 진심 어린 충고를 해주신 지호형, 휘경이형, 그리고 먼저 취업했지만 학생회 활동을 함으로써 학교생활의 큰 추억을 남기게 해준 종걸이형, 항상 저랑 함께한 민영이형, 자원처리공학실험실과, 물리탐사공학 실험실, 석유공학 실험실, 자원처리 공학실험실 선·후배와 제 얘기 들어주시고 같이 웃고 좋은 얘기 많이 해준 학과사무실의 숙현이 누나 미선이, 민혜 모두 정말 고맙고 즐거운 추억 만들어 줘서 감사합니다. 이외에도 고마운 많은 분들에게도 진심으로 감사하다는 말씀으로 드리고 싶습니다.

마지막으로 항상 저를 믿고 응원해주신 가족들에게 진심으로 사랑하고 고맙다는 말을 전하고 싶습니다. 감사합니다.

2015년 7월
김기호 드림